

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2004

Michal Kotek

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měření proudového pole za hlavní tkací tryskou metodou PIV

Flow field measurement of weaving machine nozzle using PIV method

Vedoucí diplomové práce: Doc.Ing. Václav Kopecký, CSc.

Konzultant diplomové práce: Doc. Ing. Miroslav Svoboda.

Rozsah práce:

Počet stran: 64

Počet obrázků: 53

Anotace

Cílem diplomové práce je příprava systému pro měření nestacionárních proudových polí pomocí metody PIV. Práce navrhuje obecné postupy pro synchronizaci měřicího systému se zkoumaným jevem. Následně demonstruje funkci navrženého systému při měření proudového pole za hlavní tkací tryskou pracující v reálném pulsním režimu. Výsledky měření dokumentují chování proudu trysky během rozběhu vzduchu, v oblasti ustáleného proudu a oblast doznívání.

Annotation

The main aim of the diploma thesis is to create a system for measuring of unsteady flow fields using PIV method. The report suggests procedures for synchronizing measurement system with inspected process. Next the report demonstrates function of suggested system on measuring flow field of weaving machine nozzle, working at real pulse regime. The results of measurement describe behaviour of the nozzle flow during running-up, in the steady period and in the tail of the flow.

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval Doc. Ing. Václavu Kopeckému, Csc. za velice užitečnou pomoc, trpělivost a ochotu během vedení mé diplomové práce. Rovněž děkuji konzultantovi Doc. Ing. Miroslavu Svobodovi za jeho cenné rady.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce, či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat příspěvek na náhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do její skutečné výše).

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, za odborného vedení vedoucího diplomové práce Doc. Ing. Václava Kopeckého Csc. a konzultanta Doc. Ing. Miroslava Svobody.

Veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu literatury na straně 64.

V Liberci 18. května 2004

.....

Michal Kotek

Seznam zkratek

Značka	Rozměr	Význam
d	[s]	posunutí signálu
f	[Hz]	frekvence
$f(k,l)$		funkce hodnot jasu v obraze
K		1. koeficient validace korelace
k		koeficient průměrové validace
L		2. koeficient validace korelace
l_{obl}	[m]	délka vyhodnocované oblasti
M		zvětšení obraz/objekt
m, n		indexy složek
$P1 - P4$		programovatelné výstupy
R		vrcholy v korelační rovině
S		vektor posunutí v korel. rovině
s	[s]	délka trvání synchron. signálu
v	[m/s]	okamžitá rychlost proudu
v_{max}	[m/s]	maximální rychlost v oblasti
$z(m,n)$		funkce vířivosti
Δx		posunutí v ose x
Δy		posunutí v ose y
Δl	[m]	posunutí mezi expozicemi
Δt	[s]	doba mezi expozicemi obrazu
ΔT	[s]	zpoždění v modulátoru

$\Phi_{ff}(m, n)$	autokorelační funkce
$\Phi_{fg}(m, n)$	vzájemná korelační funkce

Zkratka	Význam
CTA	termoanemometrická metoda
FFT	rychlá fourierova transformace
LDA	Laserová doplerovská anemometre
PDA	Particle Dynamics Analyzis
PIV	Particle Image Velocimetry
TTL	technologie logických obvodů
TCP – IP	síťový protokol

Obsah

Úvod	12
1.2 Prvky systému pro záznam PIV obrazu:	13
1.3 Analýza obrazů:	14
1.4 Limity metody PIV:	17
1.4.1 Délka vyhodnocované oblasti	17
1.4.2 Hustota sycení	18
1.5 Nástroje pro zlepšení výsledků korelace	19
1.5.1 Okénkovací funkce	19
1.5.2 Subpixelová interpolace	19
1.5.3 Překrývání vyhodnocovaných oblastí	20
1.5.4 Offset	20
1.6 Metody analýzy naměřených dat	21
1.6.1 Peak validace	21
1.6.2 Range validace	22
1.6.3 Validace klouzavým průměrem	22
1.6.4 Filtrování klouzavým průměrem	23
1.6.5 Výpočet mapy vířivostí	23
PIV systém pro studium nestacionárních polí	24
2.1 Popis použitého měřicího systému PIV	25
2.2 Synchronizace PIV systému a periodického děje	26
2.2.1 Synchronizace externím triggerem	27
2.2.2 Synchronizace programovatelnými výstupy	30
Popis experimentu	33
3.1 Podmínky měření	34
3.1.1 Solenoidový ventil se spínacím obvodem	34
3.2 Synchronizace s ventilem	35
3.4 Uspořádání PIV systému při experimentu	40
3.4.1 Laserový zdroj světla	41
3.4.2 Snímací technika	42
3.4.3 Řídící a zpracovatelský software	43

3.4.4	Časové rozestupy expozic obrazů	43
3.4.5	Vizualizace měřeného proudu	44
Výsledky měření proudového pole trysky.....		45
4.1	Postup měření.....	45
4.2	Zpracování měření.....	46
4.2.1	Výpočet korelace	47
4.2.2	Validace vektorů.....	48
4.2.3	Filtrování vektorové mapy	51
4.3	Výsledky měření.....	53
4.3.1	Rozběh proudu	53
4.3.2	Ustálení a doběh proudu.....	57
4.3.3	Rychlostní profil stacionárního proudu.....	58
4.3.4	Časový vývoj proudu	61
Závěr		63
Použitá literatura.....		64

Seznam obrázků

1	Principiální schéma měření metodou PIV [2].....	13
2	Zachycení obrazu kamerou [2].....	14
3	Grafická podoba autokorelační roviny [2].....	15
4	Grafické znázornění roviny vzájemné korelace [2].....	16
5	Příklad vektorové mapy.....	16
6	Výpočet vektorové mapy s užitím FFT.....	17
7	Výsledek simulace chyby měření v závislosti na sycení.....	16
8	Princip překrývání vyhodnocovaných oblastí.....	20
9	Schéma použití offsetu u vzájemné a adaptivní korelace [2].....	21
10	Uspořádání prvků měřicího systému [2].....	25
11	Zadní strana řídicí jednotky s konektory pro vstupy/výstupy.....	26
12	Blokové schéma zapojení systému synchronizace externím triggerem.....	27
12	Nastavení laseru v módu triggerovacího okna.....	28
14	Posouvání synchronizačního triggeru uvnitř jedné periody.....	29
15	Dialogové okno pro nastavení režimu spouštění měření.....	29
16	Sestavení systému pro synchronizaci programovatelnými výstupy.....	30
17	Dialogové okno s nastavením programovatelných výstupů.....	31
18	Zapojení programovatelných výstupů v konektoru.....	32
19	Měřená tkací tryska.....	33
20	Solenoidový ventil tlakového vzduchu se spínacím obvodem.....	34
21	Schéma spínacího obvodu ventilu.....	35
22	Systém a signály jednotlivých částí při synchronizaci ext. triggerem.....	35
23	Systém a signály jednotlivých prvků při synchronizaci progr. výstupy.....	37
24	Princip posouvání signálů z programovatelných výstupů.....	38
25	Generátor mlhy Safex F2010.....	39
26	Uspořádání prvků měřicího systému.....	40
27	Laser s optikou.....	41
28	Kamera s objektivem a filtrem pro záznam PIV obrazů.....	42
29	Vizualizace proudu s částicemi.....	44
30	Vizualizace rozběhu proudu.....	46

31	Surová vektorová mapa po korelaci.....	47
32	Výsledek peak validace.....	48
33	Range validace.....	49
34	Průměrová validace s koeficientem $k=0,2$	49
35	Průměrová validace s koeficientem $k=0,02$	50
36	Průměrová validace s koeficientem $k=0,05$	50
37	Nesprávná filtrace vektorové mapy.....	51
38	Vektorová mapa po správné filtraci.....	52
39	Výsledná vektorová mapa z 50 měření.....	52
40	Vektorová a skalární mapa v čase 12,1 ms – max. rychlost 22 m/s.....	54
41	Vektorová a skalární mapa v čase 12,25 ms – max. rychlost 39 m/s.....	54
42	Vektorová a skalární mapa v čase 12,5 ms – max. rychlost 51 m/s.....	54
43	Vektorová a skalární mapa v čase 12,75 ms – max. rychlost 64 m/s.....	55
44	Vektorová a skalární mapa v čase 13,0 ms – max. rychlost 108 m/s.....	55
45	Skalární mapa vířivostí v čase 12,25 ms.....	56
46	Skalární mapa vířivostí v čase 13,00 ms.....	56
47	Vektorová a skalární mapa v čase 16,0 ms – max. rychlost 290 m/s.....	57
48	Vektorová a skalární mapa v čase 50,0 ms – max. rychlost 325m/s.....	57
49	Vektorová a skalární mapa v čase 80,0 ms – max. rychlost 182 m/s.....	57
50	Vektorová a skalární mapa v čase 85,0 ms – max. rychlost 70 m/s.....	58
51	Vektorová mapa ustáleného proudu.....	59
52	Skalární mapa složky rychlosti v ose trysky u ustáleného proudu.....	60
53	Vývoj rychlostí proudu v ose trysky.....	62

Kapitola 1

Úvod

Přes velký rozmach modelovacích technik zůstává reálné měření nejužitečnejším nástrojem k poznání zkoumaných jevů. Ani stálé dokonalejší modelovací softwary spolu s výkonnými výpočetními systémy nedokáží naprosto přesně popsat chování jednotlivých dějů. I sebelepší model je vždy pouze idealizovaným nahrazením skutečného objektu. Z tohoto důvodu potřebuje dnešní doba stále dokonalejší měřicí techniky k zachycení reálných dějů ve zkoumaných procesech.

V oblasti zkoumání proudění tekutin dosahují úspěchu především bezkontaktní metody měření. Jednou z nejkomplexnějších je metoda laserové anemometrie PIV. Představuje silný nástroj pro studium proudů, nicméně vyžaduje vyspělou technologii i softwarovou podporu pro získávání a zpracování dat. Experimentátor musí zvládnout náročnou teoretickou část, bez níž by nebyl schopen provádět měření na požadované úrovni. Nastavení jednotlivých parametrů měření výraznou měrou ovlivňuje výsledky získání i analýzy dat.

Diplomová práce se věnuje popisu metody PIV, ukazuje její hlavní přednosti, požadavky na měření a nastavení systému. Důležitou roli při měření hraje synchronizace se zkoumaným dějem. Zejména pro rychlé krátké děje nelze měření bez synchronizace vůbec provádět. Jeden z úkolů práce představuje podrobné popsání celého synchronizačního aparátu a navržení postupů pro různé aplikace.

Funkci navrženého systému ověří měření vzduchového proudu za hlavní tryskou tkacího stroje. Tryska bude proměřena v reálném pracovním pulsním režimu. Jedná se o děj s extrémně rychlým vývojem proudu a s rychlostmi dosahujícími těsně podzvukových hodnot.

1.1 Princip metody PIV:

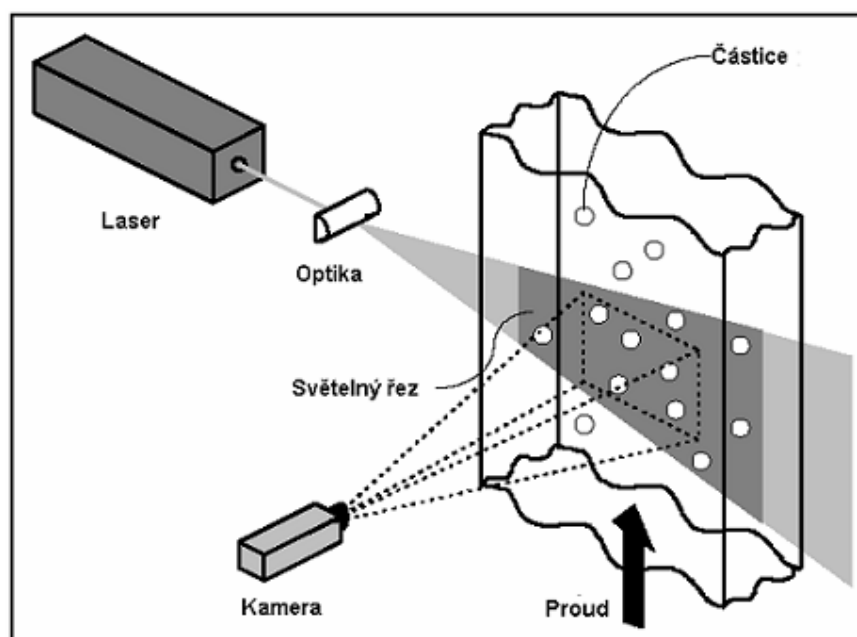
Pro zkoumání proudění v tekutinách se s výhodou používají metody laserové anemometrie. Jednou z nejmodernějších je metoda PIV —Particle Image Velocimetry. Ta umožňuje získat komplexní představu o stavu proudu v jediném časovém okamžiku. Oproti bodovým měřicím metodám představuje velký pokrok a urychlení experimentu. Základní princip je jednoduchý. Rychlost proudění je odvozena z určeného posunutí částecek unášených tekutinou mezi přesně definovanými časovými úseky a následným vypočtením podle základního vztahu pro rychlost a posunutí:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (1.1)$$

1.2 Prvky systému pro záznam PIV obrazu:

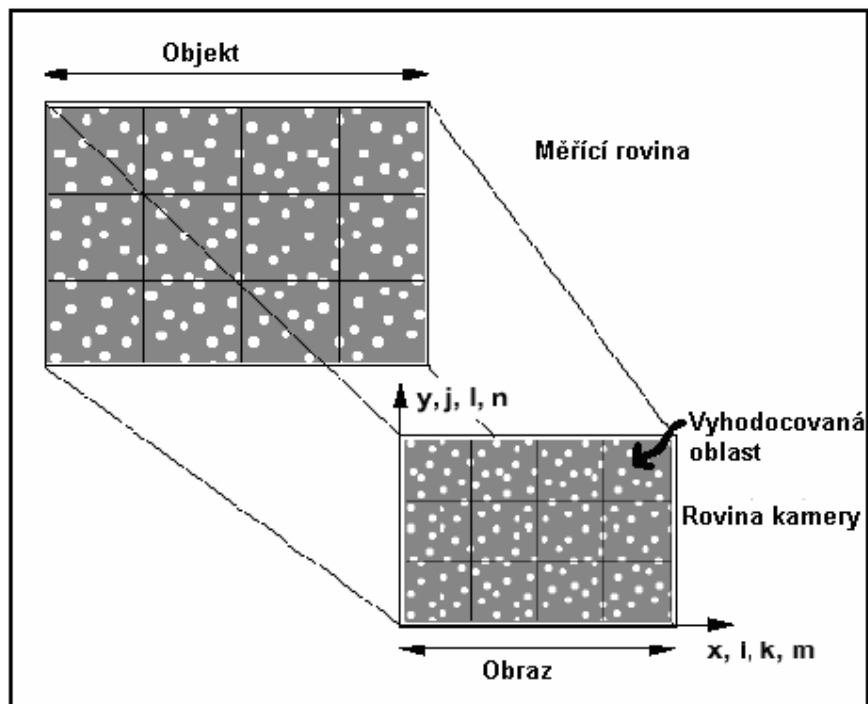
Touto metodou lze měřit pouze v prostředí, které je dostatečně transparentní. Do takového prostředí jsou umístěny drobné částčky na nichž se rozptyluje světelné záření. To je generováno laserovým paprskem rozšířeným cylindrickou čočkou do osvětlující roviny.

Při použití pulsního laseru s vhodnou dobou pulsu, lze zaznamenat speciální kamerou polohu nasvícených částecek ve dvou okamžicích vzdálených o přesný časový interval. Použitím kamery s CCD maticovým detektorem vznikne digitalizovaný obraz, vhodný pro další analýzu. Celkové uspořádání prvků pro měření metodou PIV je znázorněno na obr. 1



Obr. 1 Principiální schéma měření metodou PIV [2]

Kamerou zachycený obraz postupuje k dalšímu zpracování. V první fázi je rozdělen na pravoúhlé tzv. vyhodnocované oblasti. Pro každou takovou oblast je nutno zjistit vektor průměrného posunutí všech částic a ten zaneš do výsledné vektorové mapy. K určení průměrného posunutí v dané oblasti se provede výpočet korelační funkce. Pro výpočet skutečných posunutí, potažmo rychlostí v obrazové rovině je třeba zjistit poměr velikosti obrazové a objektové roviny, tzv. zvětšení: $M = \text{obraz} / \text{objekt}$. Obr.2 znázorňuje převedení obrazu do roviny kamery a rozdělení na vyhodnocované oblasti.



Obr. 2 Zachycení obrazu kamerou [2]

1.3 Analýza obrazů:

Pro záznam obrazu se používají dva základní způsoby:

- Při **dvojnásobné expozici** se počáteční i koncová poloha částic zaznamenává do stejného obrazu.
- Pro **jednotlivé expozice** jsou použity dva obrazy – jeden pro počáteční a druhý pro koncovou polohu částic.

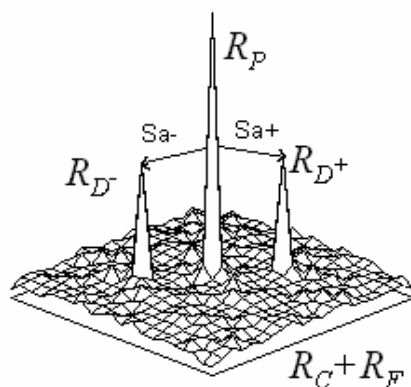
Podle způsobu snímání obrazu je zvolena příslušná korelační funkce pro získání průměrné hodnoty posunutí v dané oblasti. Obraz zaznamenaný digitální kamerou představují data ve formě hodnot jasu v jednotlivých pixelech kamery. Tento způsob zobrazení je výhodný z hlediska následných výpočetních operací.

Při dvojnásobné expozici se pro zpracování používá metoda autokorelace. V případě dat zachycených výše pospaným způsobem, se výpočet diskretní autokorelace provádí podle vzorce:

$$\Phi_{ff}(m, n) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \sum_{l=-\infty}^{l=\infty} f(k, l) \cdot f(k + m, l + n) \quad (1.2)$$

Funkční hodnota $f(k, l)$ představuje intenzitu světla zaznamenaného detektorem na pixelu s pozicí (k, l) .

Výsledkem je korelační mapa na obr. 3. V případě autokorelace obsahuje tři vrcholy (peaky). Tato metoda porovnává dvakrát stejný obraz. Z toho důvodu obsahuje hlavní vrchol uprostřed korelační roviny, představující porovnání bodu sama se sebou (nulové posunutí). Další dva vrcholy jsou menší, symetricky rozmístěné okolo centrálního vrcholu. Při porovnání každého vektoru se všemi ostatními se započte dvakrát stejné posunutí, pouze s opačnou orientací. Není totiž jasné, který bod je počáteční a který koncový. Z toho plyne další nevýhoda této metody a tou je směrová nejednoznačnost. Nelze totiž okamžitě zjistit orientaci měřeného proudění-- není jasné, který ze dvou vektorů je ten pravý. Tento problém však lze řešit použitím vhodného offsetu.



Obr. 3 Grafická podoba autokorelační roviny [2]

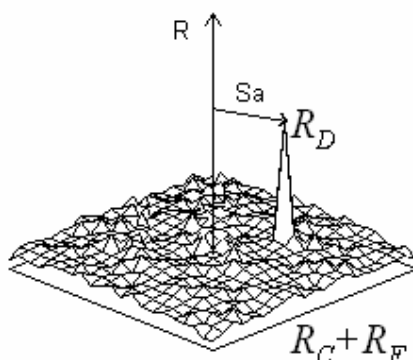
R_p představuje centrální vektor autokorelace. Spojnice mezi tímto centrálním vrcholem a vrcholy R_{D-} , R_{D+} bude S_a --výsledný vektor průměrného posunutí v této vyhodnocované oblasti. Členy $R_C + R_F$ představují hodnotu korelační šumu.

Častěji využívanou při analýze PIV obrazu je metoda vzájemné korelace. Ta zkoumá dva samostatně exponované obrazy.

Rovnice diskretního výpočtu vzájemné korelace:

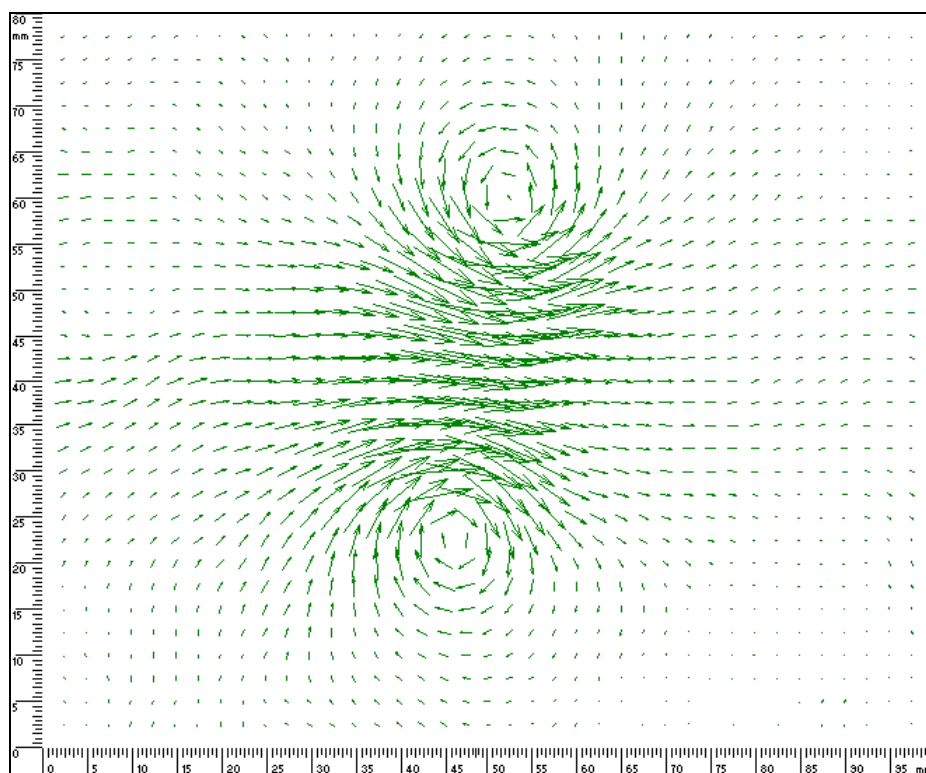
$$\Phi_{fg}(m, n) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \sum_{l=-\infty}^{l=\infty} f(k, l) \cdot g(k + m, l + n) \quad (1.3)$$

Výsledek vzájemné korelace ukazuje Obr. 4. V tomto případě není pochyb v otázce počáteční a koncové polohy částice a tedy i korelační rovina poskytuje jednoznačný výsledek. Je zde pouze jeden vrchol, jehož spojnice se středem korelační roviny udává vektor výsledného posunutí.



Obr. 4 Grafické znázornění roviny vzájemné korelace [2]

Pro takto zpracované hodnoty jednotlivých oblastí, lze vytvořit vektorovou mapu znázorňující vektory rychlostí celé měřené roviny mezi dvěma okamžiky. Obr. 5 představuje typickou podobu sestavené vektorové mapy. Ne vždy je výsledek takto jednoznačný. V řadě případů dochází ke vzniku chybných vektorů způsobujících chybu měření a ovlivňujících výsledky i ve svém okolí. V další části bude nastíněn problém vzniku chybných vektorů, postup jak jim předcházet, popřípadě je eliminovat.

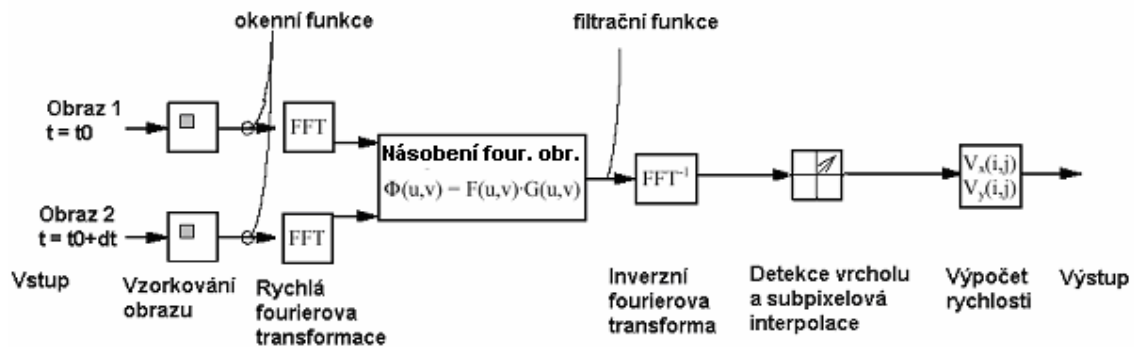


Obr. 5 Příklad vektorové mapy

Výpočet korelací pomocí FFT

Pro výpočet korelací se s výhodou využívá rychlá fourierova transformace (FFT). Výpočetně náročná operace korelace je tak nahrazena sdruženým násobením odpovídajících si párů koeficientů fourierových obrazů funkcí světelných intenzit. Korelační funkci poté vrací zpětná fourierova transformace výsledku.

Výpočet pomocí rychlé fourierovy transformace je znázorněn na obr. 6



Obr. 6 Výpočet vektorové mapy s užitím FFT

1.4 Limity metody PIV:

Jako každá, i metody PIV má svá omezovací pravidla např. v parametrech velikosti částic, rychlosti toku, či v míře sycení. Při nezvážení vhodných hodnot parametrů či nesprávném způsobu zpracování naměřených dat, lze dojít k naprosto chybným výsledkům.

1.4.1 Délka vyhodnocované oblasti

Hlavním limitním předpokladem je délka vyhodnocované oblasti a jí úměrné maximální měřitelné posunutí. Z matematických simulací vyplývá, že maximální posunutí by nemělo být větší než čtvrtina délky vyhodnocované oblasti. Rovnice pro výpočet maximální rychlosti je tedy:

$$|v_{\max}| = \frac{l_{obl}}{4 \cdot M \cdot \Delta t} \quad (1.4)$$

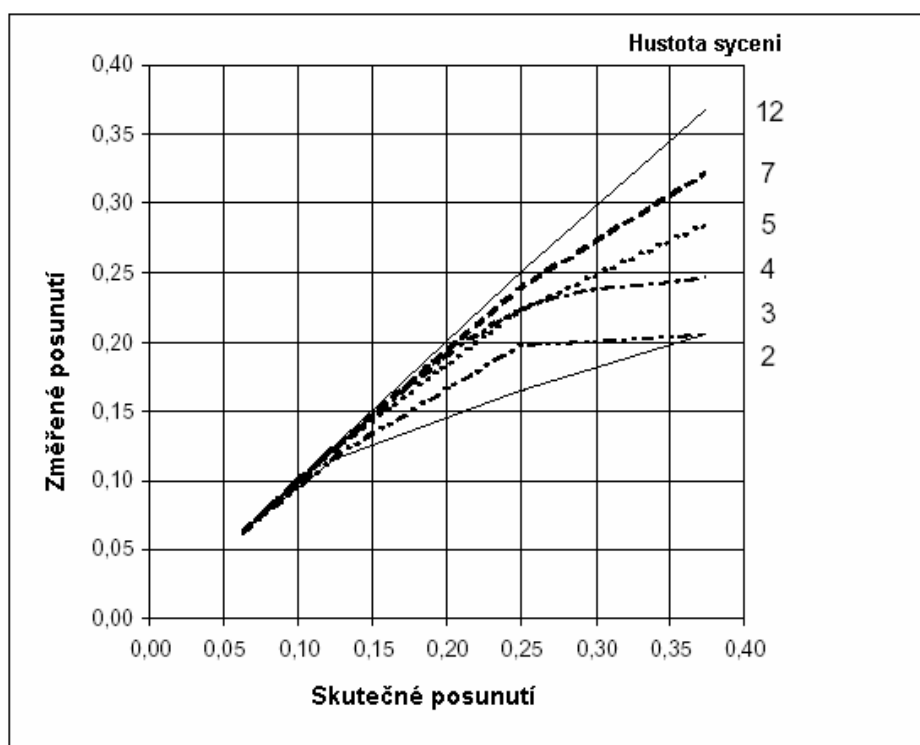
kde l_{obl} je délka strany vyhodnocované oblasti, M zvětšení a Δt doba mezi expozicemi.

Značnou chybu způsobuje existence ztracených párů. Ty vzniknou tehdy, vyletí-li částice v době mezi světelnými pulsy z vyhodnocované oblasti, nebo do ní naopak vnikne. Taková částice pak nemá svůj protějšek v druhém obrazu a dojde ke vzniku náhodných korelací. U rychlejších částic je pravděpodobnost opuštění vyhodnocované oblasti

vyšší. Dojde k většímu uplatnění částec s nižší rychlostí a výsledná rychlost se poté jeví menší než ta skutečná. Tento jev se nazývá chyba stahování rychlosti k nule.

1.4.2 Hustota sycení

Významný parametr pro přesnost měření představuje hustota sycení proudu částicemi. Při malém sycení existuje vyšší pravděpodobnost, že částice opustí mezi expozicemi vyhodnocovanou oblast. Tím vzrůstá poměr šumu korelační roviny a klesá přesnost měření. Výsledky počítačové simulace metodou „Monte Carlo“ na Obr. 7 ukazuje, jak velká chyba vzniká při daném poměru max. posunutí a délky vyhodnocované oblasti. Simulace byla provedena pro zpracování obrazu metodou vzájemné korelace.



Obr. 7 Výsledek simulace chyby měření v závislosti na sycení [2]

Z grafu na Obr. 7 lze vyčíst jaké sycení je třeba k dosažení dostačující přesnosti. Za předpokladu, že posunutí částic nebude vyšší než čtvrtina vyhodnocované oblasti, bude sycení s úrovní 5 částic na oblast vyhovující. Při obdobné simulaci pro autokorelaci vychází potřebné sycení dvojnásobné.

Doporučené hodnoty sycení v každé vyhodnocované oblasti jsou tedy:

- 5 částic pro vzájemnou korelaci
- 10 částic pro autokorelaci

1.5 Nástroje pro zlepšení výsledků korelace

Zhotovením mapy vektorů začínají možnosti analýzy výsledků. Mapa ve většině případů obsahuje velké množství chybných vektorů, způsobených chybějícími stopovacími částicemi, odleskem laserového světla od okolních objektů apod. Nastupují tedy metody k zlepšení výsledku korelací, eliminaci chybějících vektorů, filtrování map, získání požadovaného prostorového rozlišení apod.

1.5.1 Okénkovací funkce

Hlavní chybou metody PIV je vznik ztracených párů. Při výpočtu korelace nelze nalézt protějšek příslušné částice a tím se zvyšuje hodnota šumu v korelační rovině. Další zvýšení korelačního šumu představuje samotný výpočet FFT. Ten vychází z předpokladu periodického charakteru obrazové předlohy. To v našem případě poskytne chybu, tzv. fantómové (cyklické) korelace. Oba tyto problémy se vyskytují v nejvyšší míře u okrajů vyšetřovaných oblastí. Aplikací speciální okenní funkce lze přiřadit obrazům částic u okrajů nižší váhu a tím snížit jejich vliv na výpočet korelací. V praxi se používá Gaussovská okénkovací funkce a tzv. „Top-Hat“. U funkce „Top-Hat“ se bodům u okrajů přiřadí nulová váha a obrazům blíže středu váha 1. Aplikováním okenních funkcí se ztrácí informace o pohybu podstatného množství částic. Tento problém řeší překrývání vyhodnocovaných oblastí.

1.5.2 Subpixelová interpolace

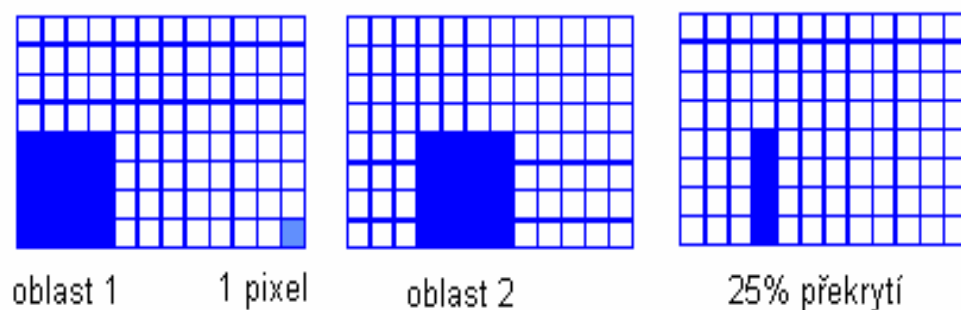
K získání přesnější informace o umístění vrcholu v korelační rovině, jeho výšce a šířce bývá využívána subpixelová interpolace. Bez použití interpolace je maximální možná přesnost omezena rozlišovací schopností použité kamery. Nelze tedy určit parametry vrcholu přesněji než na jeden pixel. Pro větší přesnost by bylo výhodnější umístit korelační vrchol mezi definované pixely. Toho lze dosáhnout při interpolaci např. gaussovskou křivkou. Pro její proložení je třeba alespoň 3 bodů. Ty reprezentují obraz jednotlivé částice. Pokud částice nezasahuje rovnou alespoň do třech pixelů snímací matice, je výhodné kameru rozostřit a tím obraz rozšířit.

Další možnost je rozšíření korelačního vrcholu speciálními filtry na úkor jeho výšky. Jeho šířka musí spadat do určitého intervalu. Bude-li vrchol příliš tenký, nebude možné správně prokládat body pro subpixelovou interpolaci, při velké šířce může docházet k ovlivnění

interpolace i malým vysokofrekvenčním šumem. Tato operace nemůže změnit polohu vrcholu v rovině a tak neovlivní určení výsledného posunutí.

1.5.3 Překrývání vyhodnocovaných oblastí

Další z možností jak zpřesnit výpočet vektorové mapy, je použití překrytí vyhodnocovaných oblastí (tzv. „Overlap“). Při výpočtu korelací dochází k použití okénkových funkcí na obrázek. Tyto funkce způsobí, že informace o částicích v krajích vyhodnocovaných oblastí nejsou efektivně využity. Při aplikaci překrytí se informace o zakrytých okrajových částicích v první oblasti použijí u zpracování vedlejší oblasti a tím se redukuje ztráta dat okénky. Překrývání lze s výhodou využít i pokud není aplikována okénková funkce, zvláště při větších rozměrech vyhodnocovaných oblastí. Ve výsledné vektorové mapě se projeví zvýšením počtu zobrazených vektorů a umožní podrobnější pohled na zkoumaný jev. Je si však třeba uvědomit, že tato operace nezlepší reálné rozlišení měření, pouze dochází k určitému druhu interpolace. Na obr. 8 je schématicky znázorněno použití „Overlapu“.

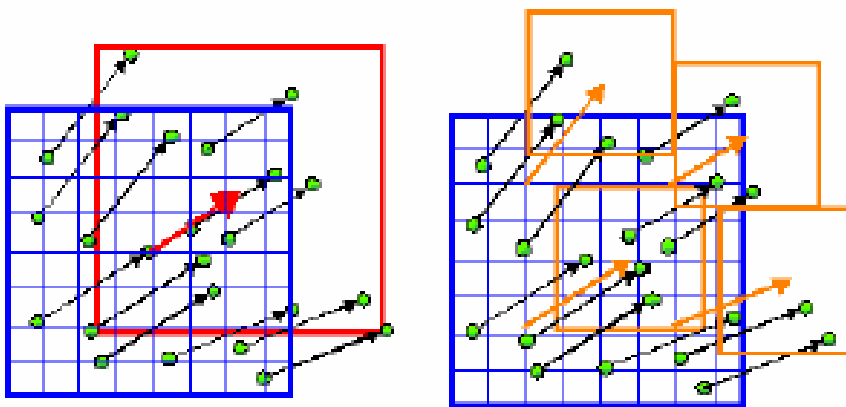


Obr. 8 Princip překrývání vyhodnocovaných oblastí

1.5.4 Offset

Hlavní chybou mající za následek šum je vznik ztracených párů. K potlačení tohoto nepříjemného jevu se využívá tzv. offset. Pozice vyhodnocované oblasti na druhém snímku se posune ve směru průměrného pohybu částic. U prosté vzájemné korelace se offset provádí pro všechny vyhodnocované oblasti stejně. Adaptivní korelace má tu výhodu, že se pro každou oblast provede samostatný výpočet offsetu. Sledování proměnného proudění je pak jednodušší a mnohem přesnější. Lze tak zachytit i malé víry v proudění s velkou translační rychlostí. Stále musíme brát v úvahu důležitost zvolení správné velikosti vyšetřovaných oblastí. Při zvolení příliš malých oblastí, dochází ke ztrátě přesnosti výpočtu i přes správný výpočet offsetu.

Na obr. 9 je znázorněn princip posunutí vyhodnocovaných oblastí mezi expozicemi. Levý obr. představuje jednoduchý offset používaný u vzájemné korelace. Při adaptivní korelaci na pravém obrázku se z velké vyhodnocované oblasti vypočtou zvlášť průměrná posunutí pro každou čtvrtinu. Posunutí v každé čtvrtině je bráno jako samostatný offset a tím dochází ke vzniku čtveřice nových malých vyhodnocovaných oblastí. Je-li to nutné, provede se těchto iterací více.



Obr. 9 Schéma použití offsetu u vzájemné a adaptivní korelace [2]

1.6 Metody analýzy naměřených dat

I při dodržení všech nutných předpokladů pro úspěšné měření dochází z různých důvodů k chybám při výpočtu vektorových map. Výsledkem korelací je tzv. syrová mapa se značným množstvím chybných vektorů. Tato kapitola popisuje některé metody pro úpravu syrových map a ukazuje další modifikace pro prezentaci výsledků. Na prvním místě se do analýzy zapojují metody validací a různé typy filtrů. Ne vždy pouhá vektorová mapa poskytne dostatečný pohled na zkoumanou problematiku. S výhodou se využívá prezentování výsledků ve formě skalárních map, map vířivostí apod.

1.6.1 Peak validace

Důležitý parametr pro určení důvěryhodnosti vypočtené korelace představuje výška hlavního vrcholu v korelační rovině. Tato funkce má odlišnou definici pro autokorelaci a pro vzájemnou korelaci. Prvním kritériem u autokorelace je poměr centrálního ku dalšímu nejvyššímu vrcholu podle vzorce (1.5). Následuje možnost stanovení odstupu od druhého nejvyššího vrcholu představujícího šum vypočteného dle (1.6). U vzájemné korelace

pochopitelně neexistuje možnost prvního kritéria a tak rozhoduje pouze poměr dvou nejvyšších vrcholů. Vektory nesplňující předepsaná kritéria jsou zahozeny.

$$\frac{\text{hlavní vrchol}}{\text{centrální vrchol}} \geq K \quad (1.5)$$

$$\frac{\text{hlavní vrchol}}{\text{druhý nejvyšší vrchol}} \geq L \quad (1.6)$$

1.6.2 Range validace

Range validace pracuje s již vypočtenými vektorovými mapami. Vyžaduje přibližnou znalost zkoumaného proudu. Je-li měřeným objektem například obyčejná tkací tryska, neměly by se na jejím výstupu vyskytovat rychlosti přesahující rychlost zvuku. Nastavením limitu na 340m/s dojde spolehlivě k eliminaci těchto nereálných rychlostí. Kromě limitu pro velikost rychlosti lze nastavit omezení pro jednotlivé složky. Tato metoda pracuje spolehlivě u homogenních proudů, pro mapy s obsahem různých rychlostí v jednotlivých oblastech je výhodná metoda klouzavého průměru. Vektory překračující zadaný rozsah jsou vyloučeny z dalšího zpracování.

1.6.3 Validace klouzavým průměrem

Validace klouzavým průměrem pracuje rovněž s hotovými vektorovými mapami. Nesoustřeďuje se však pouze na jeden vektor, ale počítá s celým jeho okolím. Ve vybraném okolí bodu mxn je vypočtena průměrná velikost rychlosti. Rozdíl jednotlivých rychlostí od tohoto průměru musí být menší než určitý koeficient k vypočtený pro každou oblast zvlášť podle vztahu 1.7. Tento druh validace vyžaduje opět určité zkušenosti, neboť nesprávná volba jednotlivých parametrů zcela zkreslí výsledek.

$$k = \alpha \cdot \max \|v(x, y) - \bar{v}(x, y)\| \quad (1.7)$$

Parametr α se dosazuje do funkce jako požadovaný akceptační faktor.

Podmínka odstranění daného vektoru:

$$\|v(x, y) - \bar{v}(x, y)\| > k \quad (1.8)$$

Na místo odstraněného vektoru lze dopočítat vektor náhradní. Ve většině případů se však doporučuje trvalá eliminace. Zamezí se tím rozšiřování chyb z okolních špatných vektorů.

1.6.4 Filtrování klouzavým průměrem

Po provedení zvolených validací bývá výhodné provést konečnou filtraci. Té se nevyužívá pouze k vyhlazení vektorových map, ale i pro minimalizaci šumu k dalšímu zpracování. Šum zkresluje především výpočty matematických derivací například pro zobrazení vířivostí apod. Během filtrace se nahradí všechny vektory hodnotou průměru z určeného okolí podle vztahu 1.9. Zvolením příliš velkých oblastí dojde k dokonalému vyhlazení rychlostních map, což je v určitých případech nežádoucí. Ztratí se tím značná část informace o rychlostních gradientech. Aplikace tohoto filtru závisí opět na citu a zkušenostech uživatele.

$$\bar{v}(x, y) = \frac{1}{m \cdot n} \cdot \sum_{i=x-\frac{n-1}{2}}^{x+\frac{n-1}{2}} \sum_{j=y-\frac{n-1}{2}}^{y+\frac{n-1}{2}} v(i, j) \quad (1.9)$$

1.6.5 Výpočet mapy vířivostí

Při měření nestacionárních jevů bývá důležité určit míru vířivostí v proudu. Ze skalárních map lze převodem výpočtu gradientů do diskretní podoby odvodit vzorec pro výpočet vířivostí. Výsledek vztahu 1.10 představuje jednorozměrná skalární mapa.

$$z(m, n) = \frac{v(m+1, n)_y - v(m-1, n)_y}{\Delta x} - \frac{v(m, n+1)_x - v(m, n-1)_x}{\Delta y} \quad (1.10)$$

Kapitola 2

PIV systém pro studium nestacionárních polí

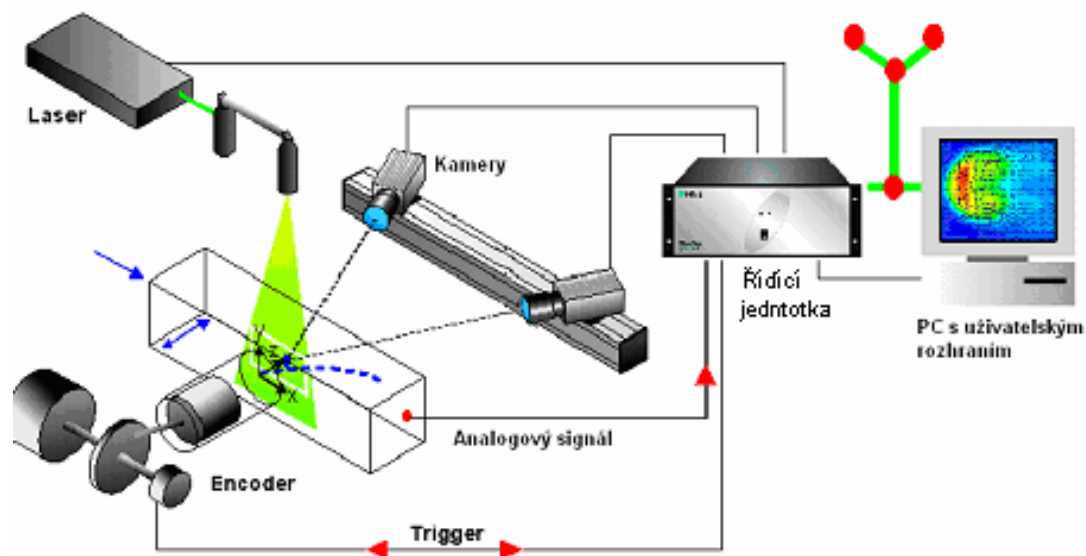
Měřicí metoda PIV představuje silný nástroj pro komplexní zmapování rychlostního pole v krátkém časovém úseku. Oproti bodovým měřicím metodám, jako je LDA, CTA apod. umožní zachytit celou zkoumanou oblast v jednom časovém okamžiku. Tím se nabízí možnost pokusit se prozkoumat vývoj určitého jevu v závislosti na čase. V případě pomalých dějů nenastává žádný problém. Systém sbírá obrazy unášených částic v přesně definovaných časech a následné vyhodnocení dat podá okamžitý přehled o zkoumaném proudu. Experimentátor se však musí zamyslet nad omezeními vycházející z reálných možností použité techniky. Hlavní problém představuje rychlost kamer a laserů. Při použití vysoce citlivých kamer klesá frekvence pořizování obrazů k jednotkám hertz. Ani standardně používané pulsní lasery nejsou schopny pracovat na vysokých frekvencích.

Přes tyto omezení existují postupy, jak podrobně popsat i rychlé děje odehrávající se v časech klesajících k řádu desítek milisekund. Tato měření vyžadují předpoklad opakovatelnosti děje. Nejlépe lze zkoumat děje periodické a to s širokým rozpětím frekvencí. Z těchto předpokladů vyvstává potřeba pro dokonalou a přesnou synchronizaci měřicího systému a zkoumaného děje. Tato kapitola bude obsahovat postupy vypracované k synchronizaci použitého měřicího systému PIV od firmy Dantec s okolními zařízeními řídícími měřený děj.

Synchronizační aparát, navržený pro měření jímž se tato diplomová práce zabývá, je plně univerzální a použitelný pro další aplikace.

2.1 Popis použitého měřicího systému PIV

Ve světě několik málo společností vyrábí systémy pro měření metodou PIV. Jednou z nich je dánská firma Dantec Dynamics. Již od druhé světové války dodává různá měřicí zařízení založená na moderních technologiích, především pro studium proudění v tekutinách. V šedesátých letech vyvinula první komerční systém pro měření drátkovou sondou a svoji inovátorskou pozici si udržuje dodnes. Bylo logické, že se s příchodem moderních technologií pustila do vývoje systémů pro laserovou anemometrii. Její měřicí systémy používající metody LDA, PDA a PIV jsou jedny z nejrozšířenějších.



Obr. 10 Uspořádání prvků měřicího systému [2]

Základ celého systému tvoří řídicí jednotka. Ta obstarává dokonalou synchronizaci mezi jednotlivými prvky systému. V první řadě laseru, tvořícího osvětlovací rovinu a kamer zachytávajících obrazy částic. Z Obr. 10 je patrné, že k systému mohou být připojeny až 2 kamery z jejichž jednotlivých obrazů lze získat plně prostorovou představu o zkoumaném ději. Náš měřený experiment díky své symetrii nepotřeboval zjišťovat třetí složku rychlosti a tak postačilo uspořádání pro 2D PIV s jedinou kamerou. Propojení řídicí jednotky a PC s uživatelským softwarem zajišťují klasické síťové karty a protokol TCP-IP. Pro vysokorychlostní přenos značného množství měřených dat je v systému instalována gigabitová síťová karta. Veškerá data zpracovává uživatel pomocí PC a instalovaného softwaru FlowManager. Tento systém se stará o komunikaci s řídicí jednotkou systému, spouští měření a umožňuje zpracovávat a analyzovat data.

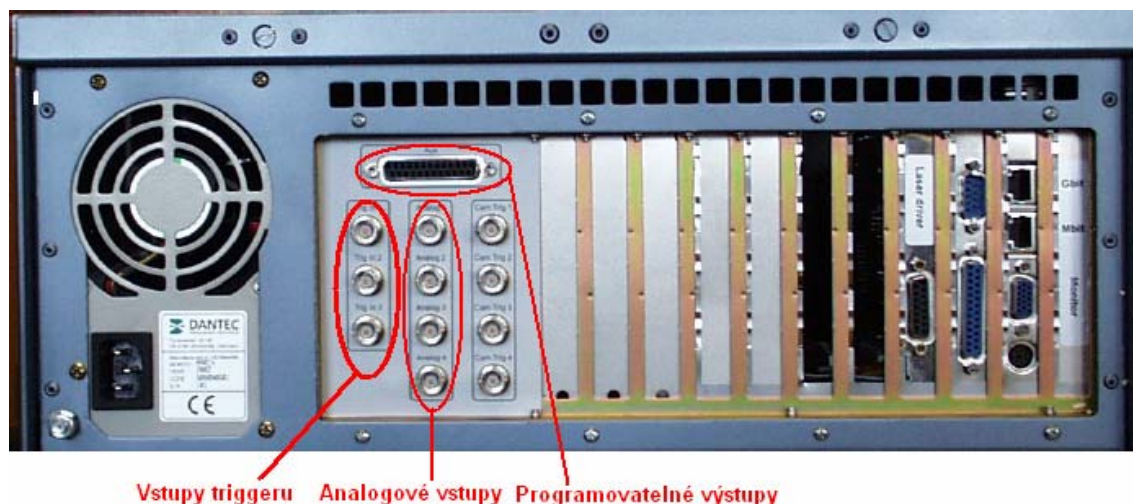
2.2 Synchronizace PIV systému a periodického děje

Srdce celého měřicího systému představuje řídicí jednotka FlowMap System Hub. Uvnitř se nejedná o nic jiného než průmyslový počítač s vlastním operačním systémem. Jádro tvoří dva výkonné procesory s taktovací frekvencí 1GHz a dostatečná operační paměť. K hlavní desce jsou připojeny další synchronizační boardy – speciální karta řídící činnost laserů, karty pro synchronizaci kamer.

Speciální přídatnou kartou je zařízení pro příjem synchronizačních vstupních signálů (triggery) a konektor pro programovatelné výstupy. Dalším obsaženým zařízením je karta s analogovými vstupy napojenými na A/D převodníky, umožňující příjem a zpracování dalších signálů důležitých pro měření. Bohužel funkce celého tohoto aparátu je obestřena tajemstvím a absolutní absencí jakékoliv dokumentace. Výrobce doposud nezajistil manuály pro práci s tímto doplňkovým aparátem a tak práce s ním nebyla snadnou záležitostí. Nicméně po dlouhodobém úsilí je systém prozkoumán a popis jednotlivých funkcí a postupů v této kapitole, může sloužit k osvětlení a zjednodušení práce na následujících projektech.

Cíl daný pro potřeby měření byl jasný. Zprovoznit aparát umožňující synchronizaci měřicího systému s okolními zařízeními. Tato úloha se dá řešit dvěma způsoby. Prvním způsobem je přijímat řídicí signály okolních zařízení a s těmi dále pracovat. Druhý přístup vychází z použití programovatelných výstupů z řídicí jednotky. Tento signál je třeba dále zpracovat a použít pro ovládání měřeného zařízení.

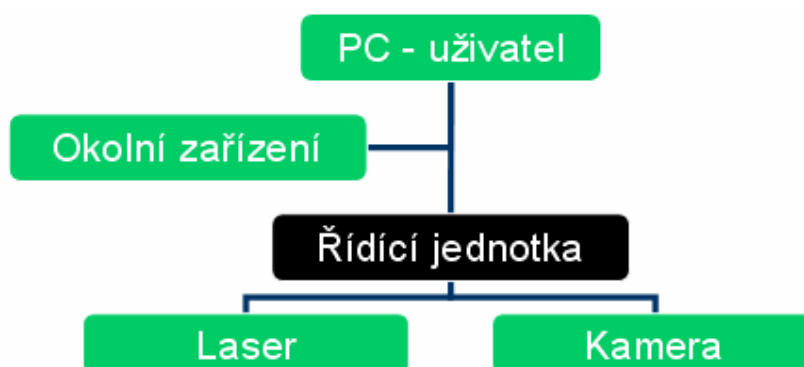
V obou případech vychází potřeba synchronizovat při každé periodě zkoumaného jevu. Jen tímto způsobem zůstane zachována dokonalá časová souhra.



Obr. 11 Zadní strana řídicí jednotky s konektory pro vstupy/výstupy

2.2.1 Synchronizace externím triggerem

V případě použití synchronizace pomocí externího spouštěče (triggeru) běží měřený experiment nezávisle. V první fázi je třeba získat z obvodu měřené soustavy vhodný signál a ten zavést do řídicí jednotky systému. Obvody řídicí jednotky jsou v tomto ohledu velice náchylné a připojení k příliš vysokému napětí může způsobit trvalou poruchu. Uspořádání jednotlivých zařízení je na schématu na Obr. 12.

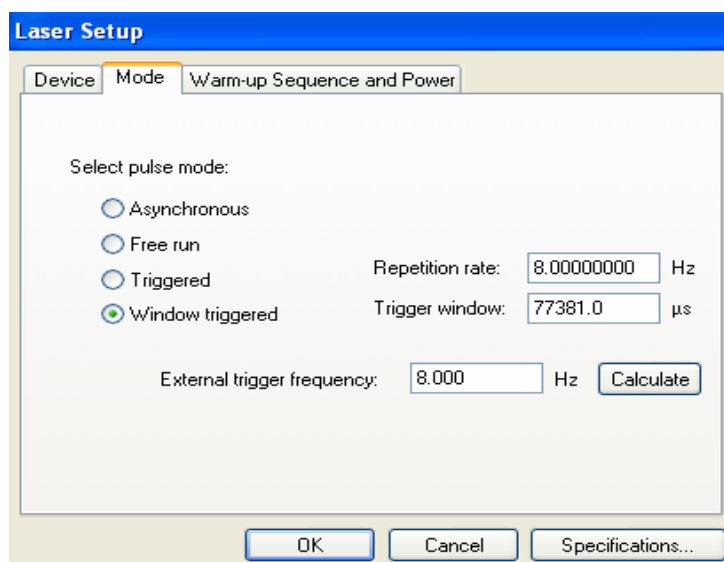


Obr. 12 Blokové schéma zapojení systému synchronizace s externím triggerem

Externí spouštěče se připojují pomocí BNC konektorů ke vstupům na zadní straně řídicí jednotky, jak je znázorněno na Obr. 11. Napěťové úrovně odpovídají standardní TTL technologii. To znamená, že příchozí signál musí spadat do rozmezí 0V – 5V. Systém je schopen reagovat na náběžnou i sestupnou hranu v závislosti na volbě. Při splnění napěťového přizpůsobení lze přejít do programového prostředí FlowManager a další nastavení provádět odtud. V prvním kroku je třeba zvolit režim chodu laserů. Pro externí spouštění se zvolí asynchronní mód popřípadě mód s tzv. triggerovacím oknem.

Laser pracující v asynchronním módu lze spouštět v jakémkoliv čase při příchodu triggerovacího signálu. Samozřejmě musí být dodržena minimální časová rezerva na vybuzení dostatečné energie pro pulsy. Při využití asynchronního módu se během experimentu vyskytly určité problémy se synchronizací popsané v dalších kapitolách.

Druhý mód použitelný pro měření s externí synchronizací pracuje na principu triggerovacího okna. Tento mód je výhodné využívat u měření, kdy je známa frekvence měřeného děje. Laser je připraven pracovat na udané frekvenci. Pro spuštění pulsu si vyčlení časový interval v závislosti na zvolené frekvenci. Při příchodu synchronizačního signálu v době tohoto okna, spustí připravený laser světelný puls. Nastavení a výpočet parametrů okna včetně předpokládané frekvence laseru a externí frekvence se provádí v dialogovém okně na Obr. 13.



Obr.13 Nastavení laseru v módu triggerovacího okna

Z Obr. 13 je patrné, že pro běžné frekvence v řádu jednotek hertz, program dopočítá triggerovací okno v délce desítek milisekund. Existuje zde tedy dostatečná rezerva pro kolísání frekvencí měřeného děje.

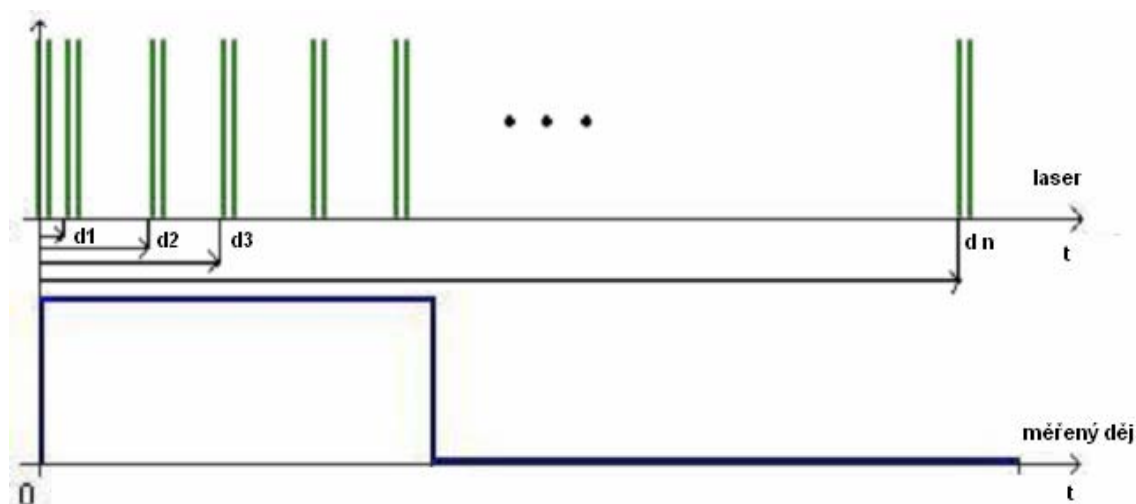
Přesný popis této funkce a algoritmy pro dopočítávání předpokládané frekvence laseru a délky okna nejsou v žádné přístupné literatuře k dispozici. Jediné co se podařilo získat je krátké vyjádření zástupce výrobce. Nicméně problematiku nastavování a funkčnosti jednotlivých parametrů neosvětlilo.

Měřicí systém byl testován v tomto módu na měření s různými frekvencemi. Nepodařilo se však zajistit stoprocentní funkčnost na všech frekvencích. Ve většině případů spouštění laseru funguje, zákonitosti pro výpočet jednotlivých parametrů přesto nalezeny nebyly. V současné době dochází k dalšímu pronikání do této problematiky ve spolupráci s výrobcem.

Pomocí osciloskopu byla proměřena zpoždění systému. Nejdůležitější parametr pro přesnost synchronizace představuje doba mezi příchodem externího spouštěcího signálu a signálem pro zážeh laseru. Zpoždění dosahovalo při měření s různými frekvencemi maximálních hodnot do jedné mikrosekundy (600 ns – 800 ns). Pro většinu měření je takto malé zpoždění nepodstatné. Při potřebě opravdu precizní synchronizace, lze s tímto parametrem počítat při zpracování výsledků.

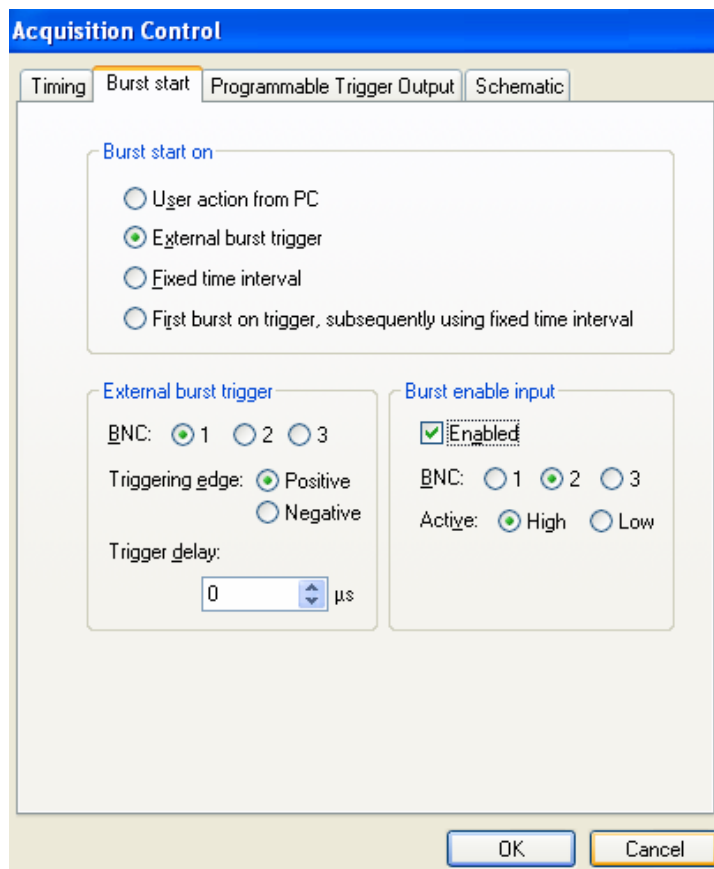
Jak tedy pomocí této funkce proměřit celý nestacionární děj? Signál externího spouštěče lze v řídicí jednotce zpoždit o přesný časový úsek s krokem jedné mikrosekundy. Proměření opakovatelných periodických dějů vyřešíme postupným získáním obrazů v jednotlivých časech od počátku periody.

Posouváním zpoždění spouštěcího signálu dojde k zachycení stavu děje v určených časech se zpožděním d , jak je znázorněno na Obr. 14.



Obr. 14 Posouvání synchronizačního triggeru uvnitř jedné periody

Po nastavení laseru do vhodného režimu uživatel zvolí v programu FlowManager způsob spouštění měření v dialogovém okně na Obr. 15.



Obr. 15 Dialogové okno pro nastavení režimu spouštění měření

Na záložce „Burst start“ se nabízí volba z několika možností. Pro synchronizace vychází nejvhodnější režim „External burst trigger“. Právě v tomto režimu každý přicházející triggerovací signál vyvolá zachycení jednoho obrazu částic.

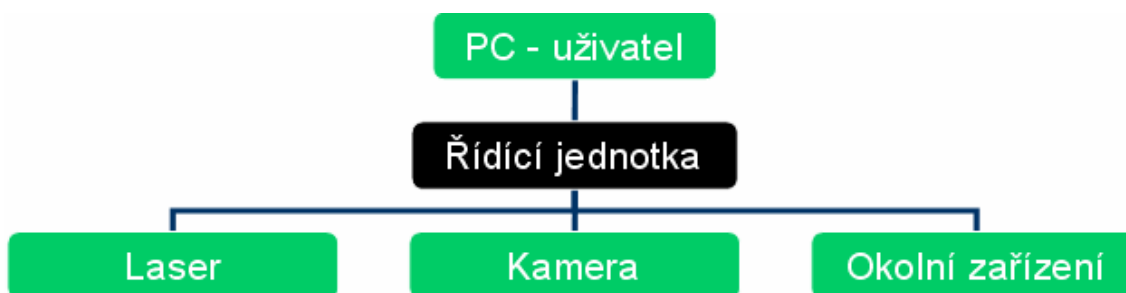
Z parametrů pro nastavení se zvolí použitý BNC konektor, reagování na náběžnou nebo sestupnou hranu a zmiňované zpoždění d startu měření po příchodu signálu definované na Obr. 14. Podstatné omezení spočívá v maximální možné hodnotě zpoždění. Software neumožní nastavit hodnotu zpoždění vyšší než cca 105 ms. Z toho jasně vyplývá omezení měření pouze na krátké děje. Delší děj je tímto způsobem neproměřitelný a je třeba hledat jiné způsoby. Nabízí se postup popsany v kapitole 2.2.2.

Nastavení „Burst enable input“ dává možnost ignorovat/reagovat na přicházející spouštěcí signál v závislosti na jiném externím signálu připojeným na nějaký ze zbývajících konektorů. Využití této možnosti závisí na vůli a potřebách uživatele.

2.2.2 Synchronizace programovatelnými výstupy

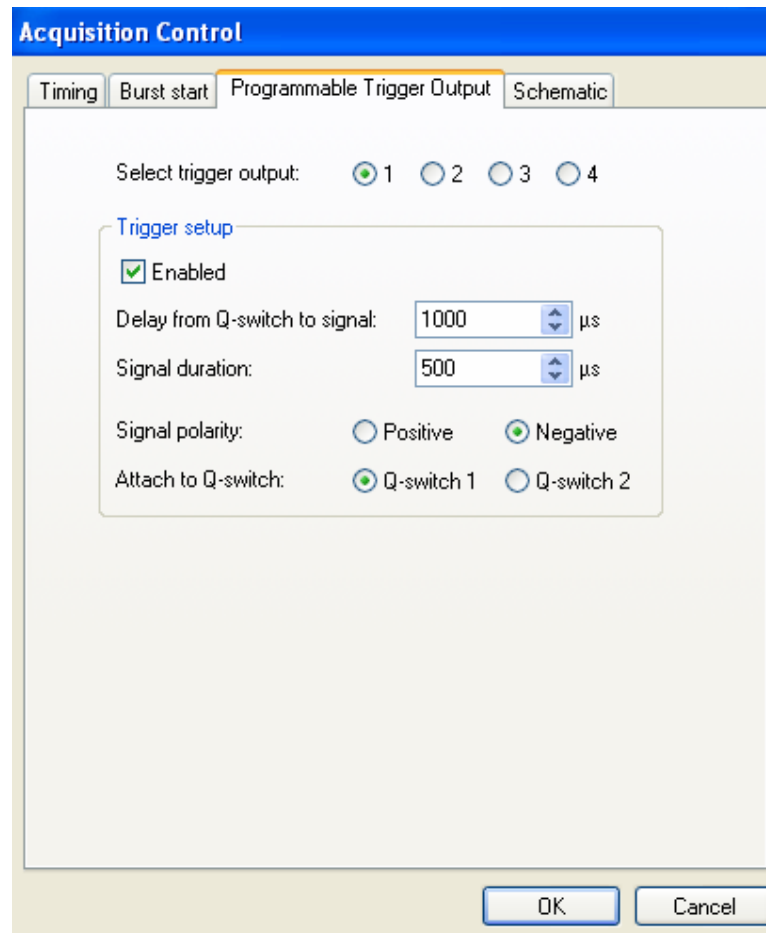
Nelze – li děj synchronizovat s měřicím systémem způsobem popsáným v bodě 2.2.1 existuje druhá možnost synchronizace. Problémy se týkají zejména dějů s časem trvání delším, než je maximální hodnota pro posunutí spouštěcího signálu.

Celý měřicí systém běží samostatně podle vnitřních časovačů. Lasery jsou nastaveny do módu „Triggered“ s přesně definovanou opakovací frekvencí. Princip synchronizace spočívá ve vysílání signálů z řídicí jednotky měřicího systému. Tyto signály lze softwarovým nastavením posouvat tak, aby došlo k postupnému proměření celého děje. Napojení jednotlivých komponentů představuje Obr. 16.



Obr. 16 Sestavení systému pro synchronizaci programovatelnými výstupy

Vlastnosti signálu se nastavují v dialogovém okně „Acquisition control“ na záložce „Programmable trigger output“



Obr. 17 Dialogové okno s nastavením programovatelných výstupů

Každý ze čtyř výstupu se dá nastavit samostatně.

Proměnnými parametry jsou: 1) zpoždění od pulsu laseru: „Delay from Q-switch“

2) trvání signálu: „Signal duration“

3) polarita signálu: „Signal polarity“

4) sfázování s danou laserovou hlavou: „Strach to Q-switch“

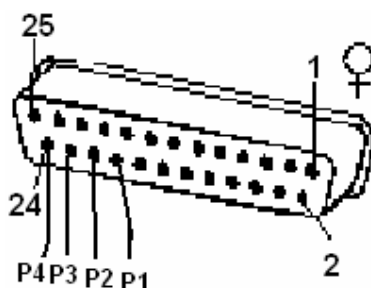
Zpoždění od pulsu zvolené laserové hlavy má pochopitelně svá omezení. Signál jde posouvat tak, aby posunutí d v součtu s délkou trvání signálu s nepřesáhlo jednu periodu laseru. Podmínku vyjadřuje vztah 2.1

$$d + s < \frac{1}{f_{\text{laseru}}} \quad (2.1)$$

Program nabízí možnost posunutí signálu před laserový puls. Maximální posuv však v tomto směru dosahuje maximálně 190 μ s. Pro potřeby měření je tato hodnota zanedbatelná.

Charakter signálu lze zvolit jako signál s klasickou TTL logikou nebo s negativní TTL logikou.

Signál z programovatelných výstupů je přiveden na zadní 25 – pinový konektor. Bohužel číslování pinů v manuálech neodpovídá standardnímu značení a tak je schéma zapojení raději znázorněno na Obr. 18.



Obr. 18 Zapojení programovatelných výstupů v konektoru

Programovatelné výstupy P1 - P4 z nastavení na Obr. 17 jsou vyvedeny na 4 levé spodní piny konektoru. Celá vrchní řada pinů obsahuje společnou zemi.

Jak bude výstupní signál využit zaleží plně na požadavcích a schopnostech experimentátora a na povaze měřeného děje. Lze vypouštět buďto krátké pulsy pro spouštění dalších obvodů, nebo tvořit signály s delší úrovní logické 1 např. pro přímé otevírání ventilů, klapek apod. V každém případě však musí být splněna podmínka 2.1 nebo nebude možné měření vůbec spustit. Vzhledem k TTL povaze signálu se s výhodou používá krátkých pulsů jako externích triggerů pro různé generátory funkcí. Tyto pulsy pak lze pohodlně a efektivně modulovat na požadované řídicí funkce pro obvody prvků měřené soustavy. Nezanedbatelnou roli by mohlo hrát zpoždění v modulátorech. I když reálné zpoždění programovatelných výstupů nedosahuje měřitelných hodnot, čas potřebný na modulaci signálu může znamenat narušení přesnosti synchronizace.

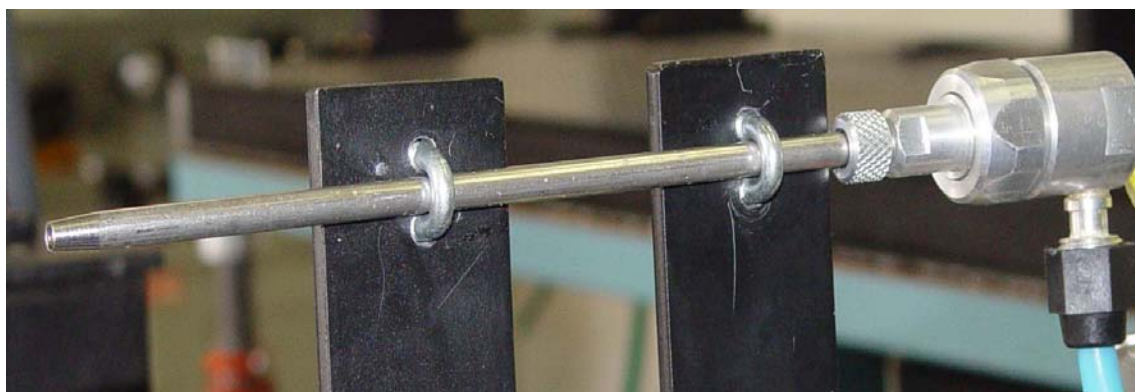
Kapitola 3

Popis experimentu

Navržený PIV systém a postupy pro studium nestacionárních proudových polí bylo třeba ověřit na reálném měření. Zajímavý problém představuje měření proudových polí trysek. Vzhledem k dlouhodobé tradici libereckého textilního průmyslu přijala naše laboratoř námět k podrobnému prozkoumání hlavní trysky tkacího stroje. Tato aplikace měření PIV systémem je velice náročná z důvodu extrémních rychlostí proudu a krátkého časového úseku přechodného děje.

V minulosti již měření tkacích trysek v laboratořích Technické univerzity v Liberci probíhala. Vzhledem k používaným technikám však nebylo možno prostudovat rozběhy trysek a tak se měřily pouze rychlostní profily v ustáleném stavu během kontinuálního režimu. Tento režim spolehlivě aproximuje oblast ustáleného proudu, která je pro tkací proces nejdůležitější. Reálný pracovní režim tkací trysky je poněkud odlišný.

S frekvencí danou otáčkami stroje unáší proud vzduchu z trysky útkovou nit' skrz prošlup tkací osnovy. Po prohozu se prošlup překříží a probíhá další prohoz útku. Tímto postupem dochází k provázání osnovních nití s útkovými a vzniku plátnové vazby. Bylo by nežádoucí, aby proud narušoval křížení osnovních nití a tak se pomocí elektromagnetického ventilu vzduch uzavírá. Stálý proud by navíc představoval značnou energetickou náročnost. Během tkacího procesu tryska (Obr.19) pracuje v pulsním režimu.



Obr. 19 Měřená tkací tryska

Tryska jejíž rychlostní pole bylo měřeno, vznikla ve VÚTS v Liberci. Průměr trysky u ústí dosahuje 4 mm, délka trubice je přibližně 20 cm.

3.1 Podmínky měření

Měření proudového pole trysky bude probíhat v podmínkách blízcích se reálnému provozu v tkacím stroji. Pro zajištění pulsního režimu byl přívod vzduchu opatřen solenoidovým ventilem. Po zjištění parametrů a potřeb ventilu byl navržen a sestaven řídicí spínací obvod. Díky tomuto obvodu a jeho přizpůsobení na technologii TTL mohl ventil pracovat podle požadavků na synchronizaci s celým PIV měřicím systémem. Univerzálnost spínacího obvodu spočívala v možnosti spolupráce s oběma synchronizačními postupy popsány v bodě 2.2.1 a 2.2.2 i s dalšími zařízeními např. generátory funkcí apod.

Právě řízení z generátoru funkcí HP 33120A se projevilo jako velmi užitečné. V kombinaci synchronizačního aparátu s programovatelným generátorem se podařilo obejít chyby v systému PIV znemožňující přesné sfázování děje a měření.

Po konzultaci s odborníky na textilní stroje byly stanoveny základní podmínky měření:

- 1) Vstupní přetlak vzduchu: 0,4 MPa při otevřeném ventilu
- 2) Otáčky tkacího stroje cca 500 otáček/minutu \Rightarrow frekvence ventilu = 8 Hz
- 3) Doba otevření ventilu = 40 % periody = 50 ms

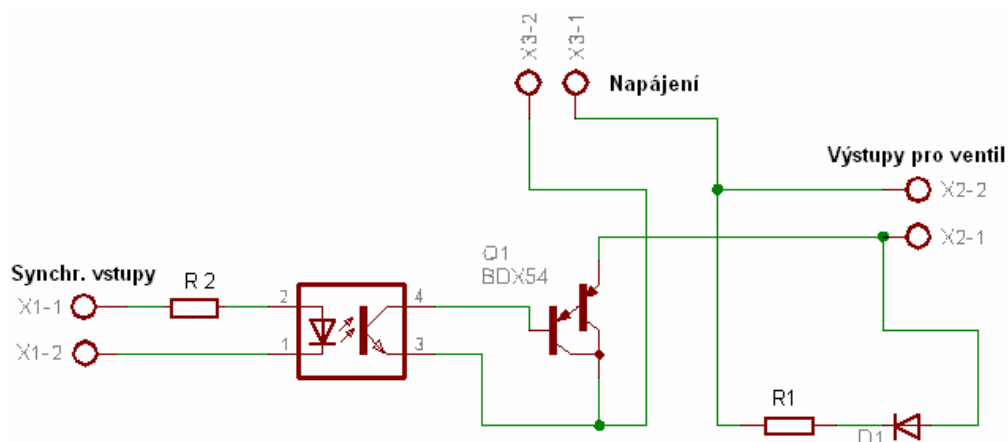
3.1.1 Solenoidový ventil se spínacím obvodem

Přívod stlačeného vzduchu do trysky řídil elektromagnetický ventil (Obr. 20). Ventil při napájecím napětí 24 V dosahuje výkonu 14 W. Limitujícím faktor pro provoz ventilu představuje doba uzavírání a z ní odvozená maximální frekvence. Ventil je schopen vykonávat pulsní režim do maximální frekvence 14 Hz.



Obr. 20 Solenoidový ventil tlakového vzduchu se spínacím obvodem

K ovládání ventilu slouží spínací obvod. Schéma tohoto obvodu je zachyceno na Obr. 21.



Obr. 21 Schéma spínacího obvodu ventilu

Prvky obvodu:

- 1) darlingtonův spínací tranzistor BDX 54
- 2) odpor $R1 = 1 \Omega$ pro urychlení vybití solenoidu
- 3) dioda D1 - BY 228 chrání tranzistor proti proražení
- 4) optočlen pro galvanické oddělení
- 5) odpor $R2 = 1000 \Omega$ pro napěťové přizpůsobení z TTL logiky
- 6) chladič proti přehřátí tranzistoru

Prvky spínacího obvodu jsou zasazeny do desky plošných spojů (Obr. 20).

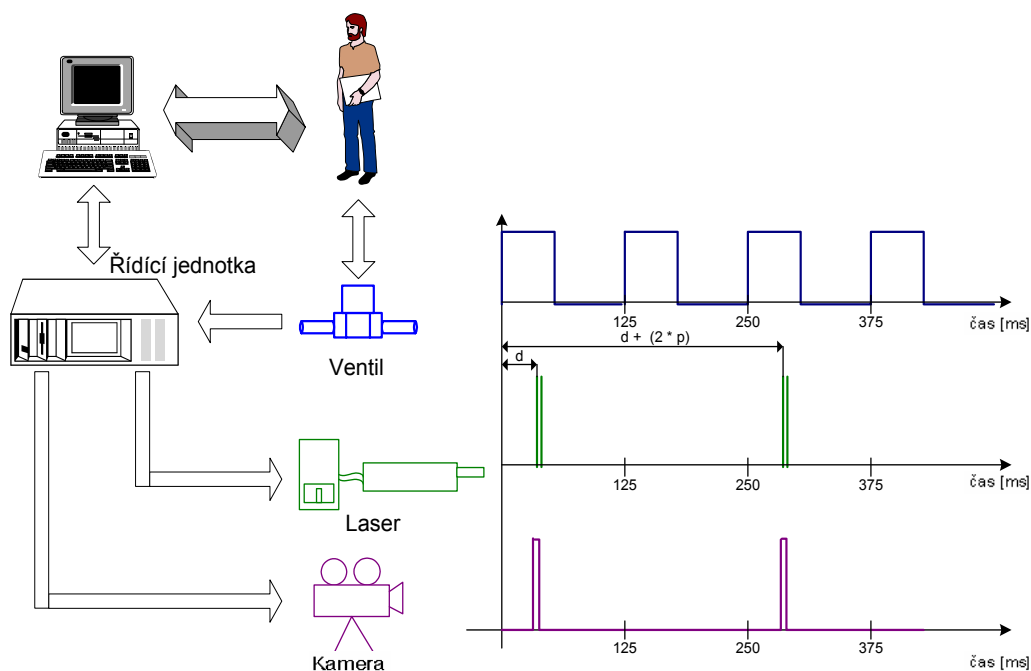
Napájení obvodu zajišťuje stabilizovaný zdroj Utes BK 180. Na synchronizační vstup může být zaveden signál přímo z řídicí jednotky PIV nebo z jiných zdrojů. Pro potřeby měření byl obvod spínán obdélníkovou funkcí z generátoru HP 33120A. Vnitřní funkce generátoru umožňují připravit signál s frekvencí 8 Hz a délkou trvání horní úrovně signálu 50 ms.

3.2 Synchronizace s ventilem

Pro oba způsoby synchronizace popsanými v kapitole 2.2 vyhovuje spínání obvodu ventilu přes generátor funkcí HP 33120A.

První způsob synchronizace navržený v bodě 2.2.1 nechává pracovat trysku samostatně. Generátor funkcí pracoval ve standardním režimu obdélníkového signálu. Výchozí signál z generátoru měl frekvenci 8Hz, z toho 40 % periody (50 ms) na horní úrovni, zbylých 60 % v dolní úrovni. Amplituda signálu dosahovala 2 V přičemž pomocí offsetu bylo dosaženo posunutí do rozmezí 0 V - 4 V. Fáze signálu byla nulová. Generátor funkcí

obsahuje kromě klasického výstupu ještě jeden výstup synchronizační. Rozsah výchozího signálu odpovídá hodnotám pro TTL technologii. Signál je přesně sfázován s funkčním výstupem. Přímé napojení tohoto synchronizačního signálu na externí trigger měřicího systému umožňuje přesně spouštět měření v závislosti na stavu ventilu. Kapitola 2.2.1 podrobně popisuje postup nastavení měřicího systému pro potřeby takovéto synchronizace. Hodnota zpoždění triggeru d v menu na Obr. 15 posune zachycení obrazů částic do udaného času od spuštění ventilu. Postupné posouvání zpoždění triggeru umožní proměřit celou oblast jedné periody. Limitující hodnotou posunutí je již dříve zmiňovaných 105 ms. Při měření trysky v režimu 8 Hz toto zpoždění stačilo, u jiných aplikací by již mohlo docházet k problémům. Vzhledem k maximální frekvenci kamery byla snímána pouze každá druhá perioda. Blokové schéma zapojení jednotlivých komponent při měření spolu se signály ukazuje Obr. 22.



Obr. 22 Systém a signály jednotlivých částí při synchronizaci ext. triggerem

Druhý způsob synchronizace popsáný v 2.2.2 využívá generátor funkcí jako modulátor signálu z programovatelného výstupu. Puls vycházející z programovatelného výstupu PIV systému, je zaveden na vstup externího signálu generátoru HP 33120A.

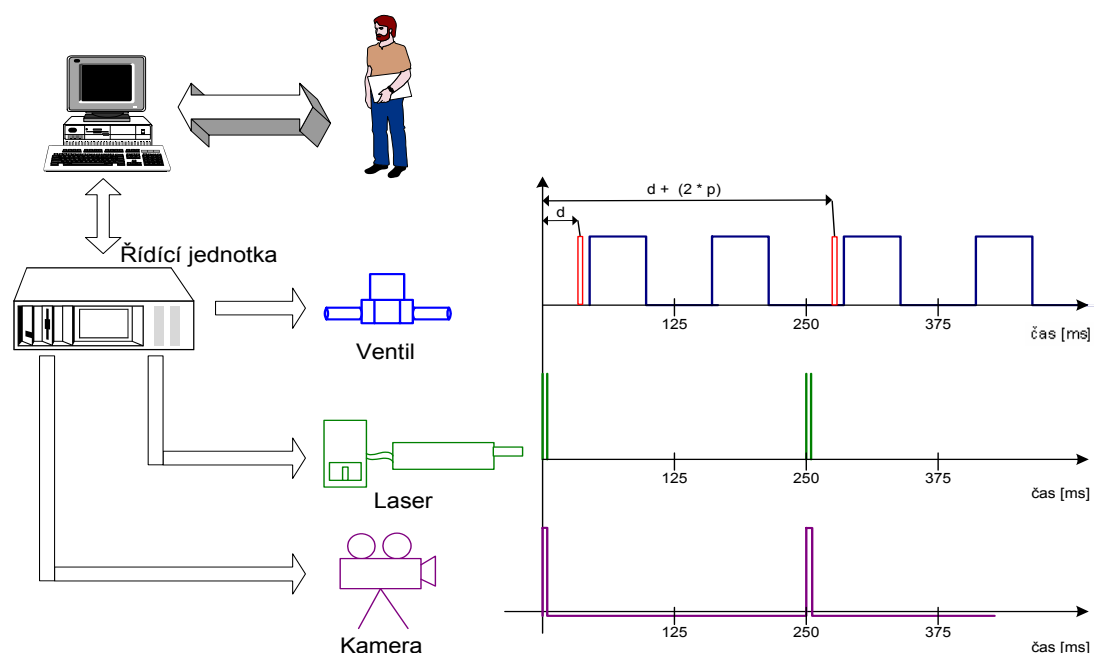
Maximální opakovací frekvence kamer jsou 4 Hz. Z programovatelného výstupu systému vyjdou také tedy pouze 4 synchronizační pulsy za sekundu. Pro potřeby 8 Hz chodu trysky bylo nutno dosáhnout zdvojení frekvence.

Modulace příchozího signálu v generátoru byla nastavena následovně:

- 1) režim generátoru: burst mode, external triggered
- 2) frekvence modulovaného signálu: 8,0001 Hz
- 3) amplituda: 2 V
- 4) offset: + 2 V
- 5) počet period: 2
- 6) fáze signálu: 0 stupňů

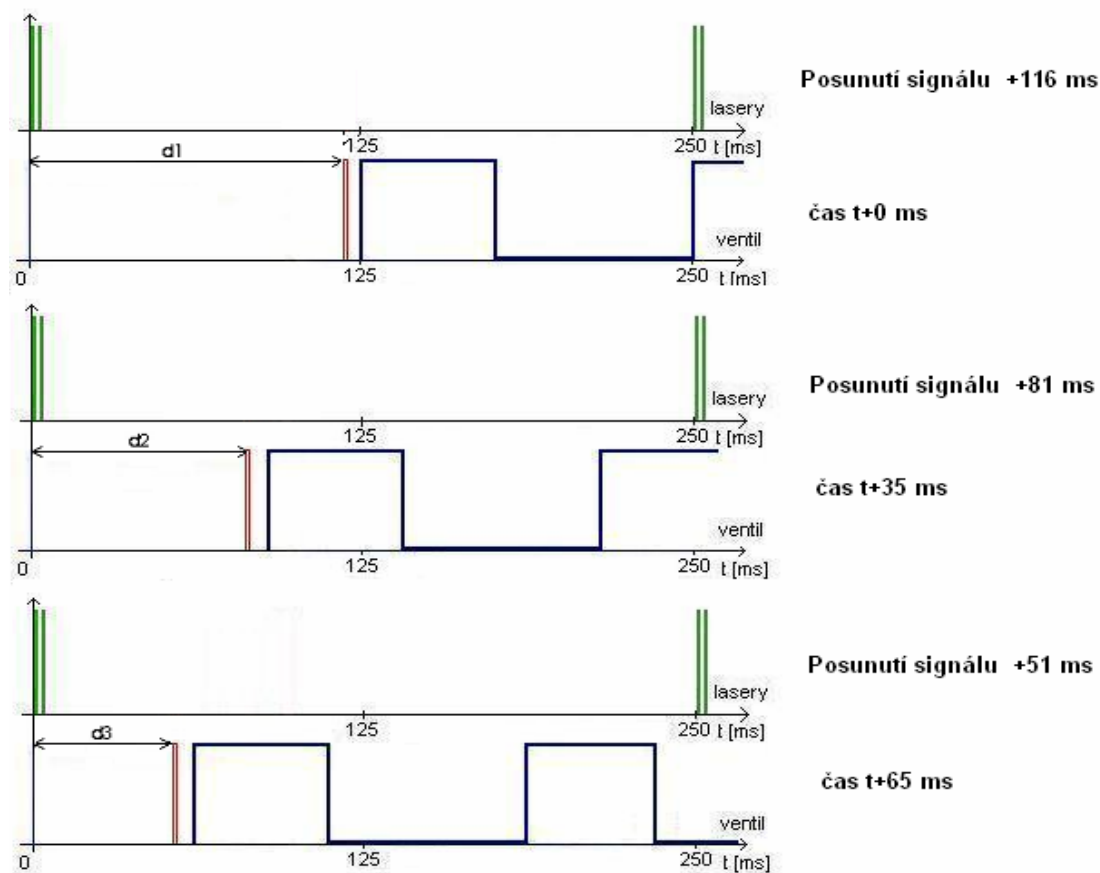
Při modulaci takového signálu dochází ke dvěma problémům. Po příchodu externího pulsu provede generátor celou sekvenci modulace. Do té doby nereaguje na žádný další triggerovací signál. Z toho důvodu musela být posunuta frekvence na 8,0001 Hz. Tím je zaručeno ukončení obou period těsně před příchodem dalšího triggerovacího signálu z měřicího systému. Odchyłka v případě zvýšené frekvence o 0,0001 Hz dosahuje 1,5 μ s, což je pro podmínky měření zanedbatelná hodnota. Mnohem větší problém představuje zpoždění uvnitř generátoru. Požadovaný signál pro otevření ventilu vychází z generátoru až 9 ms po příchodu externího triggeru. Tato hodnota výrazným způsobem ovlivňuje časovou souvislost měření a je třeba ji zahrnout do výpočtu potřebného posunutí.

Schéma propojení spolu se signály jednotlivých zařízení představuje Obr. 23



Obr. 23 Systém a signály jednotlivých prvků při synchronizaci progr. výstupy

Princip výpočtu potřebného posunutí programovatelných výstupů je zobrazen na Obr. 24.



Obr. 24 Princip posouvání signálů z programovatelných výstupů

Na Obr. 24 představuje zelená dvojčára záblesk laserů a zachycení obrazů kamerou. Červený synchronizační puls z programového výstupu je posunut o hodnotu d vypočtenou ze vztahu 3.1. Modrý průběh signálu pro otevření ventilu je zpožděním modulace v generátoru funkcí.

$$d = 125 - 9 - \Delta T \quad (3.1)$$

Měřicí systém snímá proud až v druhé periodě otevření ventilu, proto prvotní posunutí o 125 ms. Pro vykompenzování zpoždění generátoru je nutno odečíst posuv o dalších 9 ms. ΔT představuje konkrétní požadovaný čas [ms] pro měření od spuštění ventilu.

Oba způsoby synchronizace mají své výhody i omezení. Během měření byly vyzkoušeny a ověřeny obě možnosti. Dosažené výsledky se rovnají, nesmí však být opomenuto zpoždění na jednotlivých prvcích synchronizačního obvodu.

3.3 Sycení stopovacími částicemi

Metoda PIV neumožňuje měření pohybu proudu samotného, ale částic jež jsou proudem unášeny. V závislosti na povaze experimentu jsou na částice kladeny určité nároky.

V první řadě musí částice rozptylovat dostatečné množství světla. Uspořádání jednotlivých komponent systému způsobuje, že kamera snímá částici kolmo ke směru ozáření laserovým zdrojem. Z povahy rozptylu se právě do tohoto kolmého směru rozptyluje nejméně světla. Částice by tedy měla být co možná největší.

Opačný požadavek na rozměr částice vychází ze zkoumání dynamiky částic. Příliš hmotné částice s velkou setrvačnou silou nejsou schopny dokonale reagovat na změny rychlostí v proudu. Výsledná dráha částice neodpovídá skutečné dráze tekutiny a získané výsledky nelze považovat za věrohodné.

Nalezení kompromisu mezi těmito dvěma požadavky a výběr vhodných stopovacích částic značnou měrou ovlivní kvalitu celkových výsledků.

Pro potřeby experimentu byly vybrány stopovací částice z generátoru Safex (Obr. 25).

Generátor Safex F2010plus produkuje částice kouřové mlhy. Aerosol z ohřáté speciální tekutiny je rozprášen do vzduchu. Z důvodů náhlého zchlazení kondenzuje ve vzduchu na miliardy malých kulových částíček. Výsledkem kondenzace vzniká seskupení podobné mlze.



Obr. 25 Generátor mlhy Safex F2010

Podstatný problém představovalo rovnoměrné sycení proudu. Vznikající mlha byla umístěna do 500 litrového zásobníku.

Sací efekt trysky pro zachycení útkové nitě se osvědčil při zavádění sytících částic. Ty byly do ejektoru trysky dodány právě útkovým otvorem. Samotné sání trysky nestačilo k čerpání potřebného množství částic ze zásobníku přes dlouhé hadice. Z toho důvodu musel být do obvodu sání částic připojen regulovatelný ventilátorek, vhánějící částice těsně k ústí trysky. Otáčky ventilátorku byly upravovány v závislosti na momentální potřebě průtoku sytících částic. V době rozběhu trysky se částice nestihnou rozptýlit v malém množství vzduchu protékajícím tryskou. Ventilátor je vypnutý, sací efekt trysky zajišťuje dostatečné sycení. S časem od otevření ventilu roste rychlost a průtočné množství vzduchu, počet částic se musí zvyšovat. V oblasti ustáleného proudu vyžadovalo měření co největší možný přísun částic, ventilátorek pracoval na 100 %.

Ani maximální možné průtočné množství částic dostatečně nesytilo rozběhlý proud vzduchu. Intenzita laseru proto musela být zvýšena takřka na dvojnásobek oproti měření v oblasti rozběhu. Tím došlo k lepšímu rozptylu světla i na malých částicích.

3.4 Uspořádání PIV systému při experimentu

Sytém použitý pro měření proudění za tryskou odpovídal klasickému uspořádání 2D-PIV.

Laser tvořil světelný řez v horizontálním směru a z vrchu obraz snímala kamera.



Obr. 26 Uspořádání prvků měřicího systému

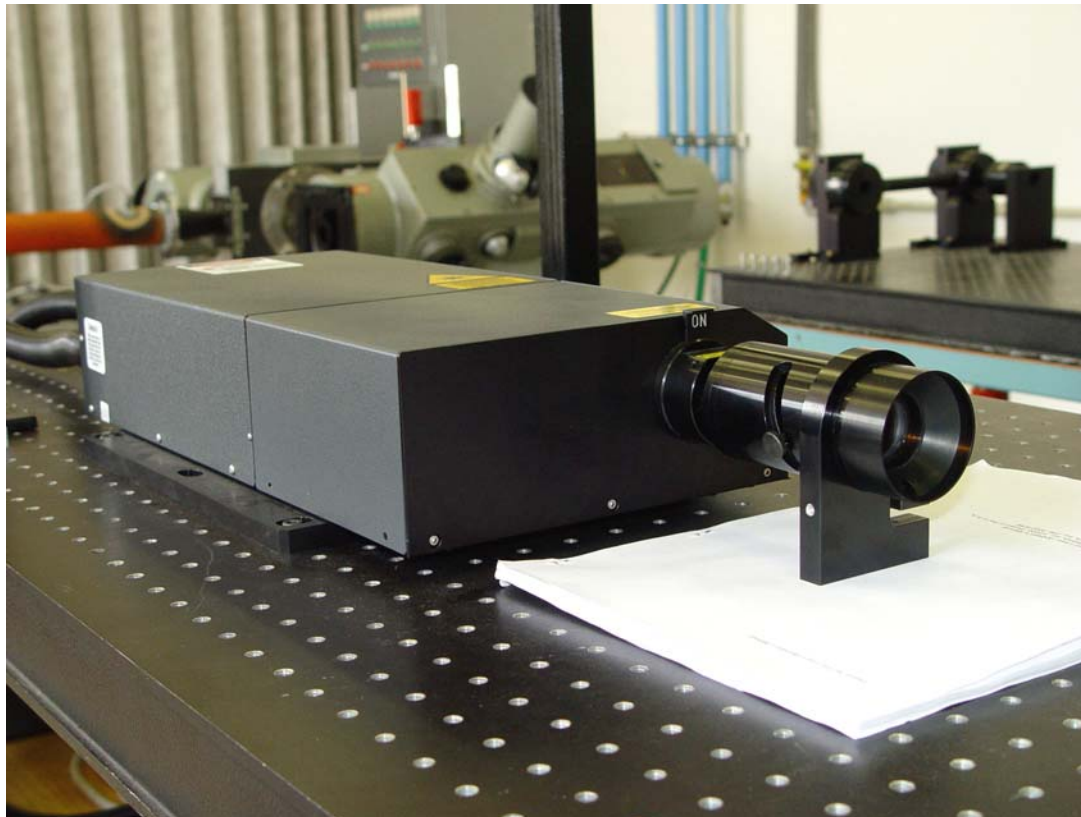
3.4.1 Laserový zdroj světla

Osvětlení částic ve zkoumané rovině zajišťoval pulsní laser NewWave Gemini. Jedná se o pevnolátkový Nd: YAG laser. Čerpání zajišťuje speciální výbojka. Nd:YAGový krystal excituje záření o vlnové délce 1064 nm. Tato hodnota odpovídá neviditelnému infračervenému svazku. Generátorem druhé harmonické je z IR světla získáno záření s vlnovou délkou 532 nm. Toto světlo má zelenou barvu a odpovídá potřebám měření. Světelná energie jednoho pulsu dosahuje hodnoty 120 mJ. Energie se z laseru uvolní během 10 ns pulsu, což odpovídá výkonu 12 MW.

Z potřeby získat dva těsně za sebou jdoucí pulsy, obsahuje laser dvě samostatné laserové hlavy. Každá má svůj vlastní zdroj, výbojku i krystal. Díky tomu mají oba pulsy stejnou intenzitu a mohou být uvolněny v krátkém časovém odstupu.

Na výstup laseru je připojena speciální optika zajišťující rozšíření paprsku do měřicí roviny. Mimoto optika umožňuje nastavit optimální parametry světelného řezu. Při měření byl vzhledem k malým rozměrům trysky nastaven řez na minimální tloušťku.

Pro potřebné osvětlení mikronových částíček v proudu s maximální rychlostí pracoval laser na 70% maximálního výkonu. Obr. 27 zachycuje laser spolu s optikou.



Obr. 27 Laser s optikou

3.4.2 Snímací technika

Obrazy částic osvětlených laserových řezem zaznamenává speciální kamera. Použitý systém obsahuje kameru HiSense 12bit. Výhodou této černobílé kamery je její 12 bitové jasové rozlišení. Nevýhodou je naopak objem dat každého obrazu. Jeden dvojobraz zachycující počáteční i konečnou polohu částic zabírá v rozlišení 1280x1024 pixelů přes 5 MB. Z tohoto důvodu je i značně omezena opakovací frekvence kamery. V režimu jednotlivé expozice pracuje kamera s maximální frekvencí 4,5 Hz. Na speciálním čipu kamery je u každé obrazové buňky přidružena buňka paměťová. Do této paměťové buňky je uložen první obraz s počáteční polohou částic a ihned (min 1,5 μ s) může být exponován obraz druhý. Poté následuje časový úsek pro odklizení obou obrazů.

Pro měření těsně podzvukových rychlostí vznikl požadavek na nastavení nejmenšího možné času mezi jednotlivými expozicemi obrazů. Výrobce v dokumentaci zaručoval bezchybný chod kamery pro čas 0,4 μ s. Během měření se podařilo dosáhnout nejmenšího funkčního času 1,5 μ s. Na kameře byl použit standardní fotoobjektiv AF Micro-Nikkor s ohniskovou vzdáleností 60mm. Objektiv se vyznačoval výbornou světelností a možností ostření na minimální vzdálenost. Díky tomu byly získány detailní záběry proudu v rozlišení 25x15 mm. Pro potlačení optického šumu byl na objektivu namontován filtr propouštějící pouze světlo s vlnovou délkou blízkou 532 nm.



Obr. 28 Kamera s objektivem a filtrem pro záznam PIV obrazů

3.4.3 Řídící a zpracovatelský software

Všechna zařízení systému lze ovládat a nastavovat přes uživatelské rozhraní. Firma Dantec pro řízení a zpracování měření vyvinula software FlowManager. Tento software zastřešuje celé měření, zpravuje databázi s naměřenými data a umožňuje provádět analýzy výsledků. Jeho součástí jsou propracované algoritmy pro výpočet obou druhů korelací. Při měření byl použit FlowManager verze 4.30.27. Další možnosti programu budou ukázány na jednotlivých výsledcích v kapitole 4.

V řídicí jednotce Hub běží vlastní software. Ten je na jednotku nahráván při každém spuštění. Právě tento software zajišťuje synchronizaci měření s okolím, spouštění laserů a kamer. Získaná data nahrává do vyrovnávací paměti a postupně je odesílá přes síťové karty do PC s FlowManagerem.

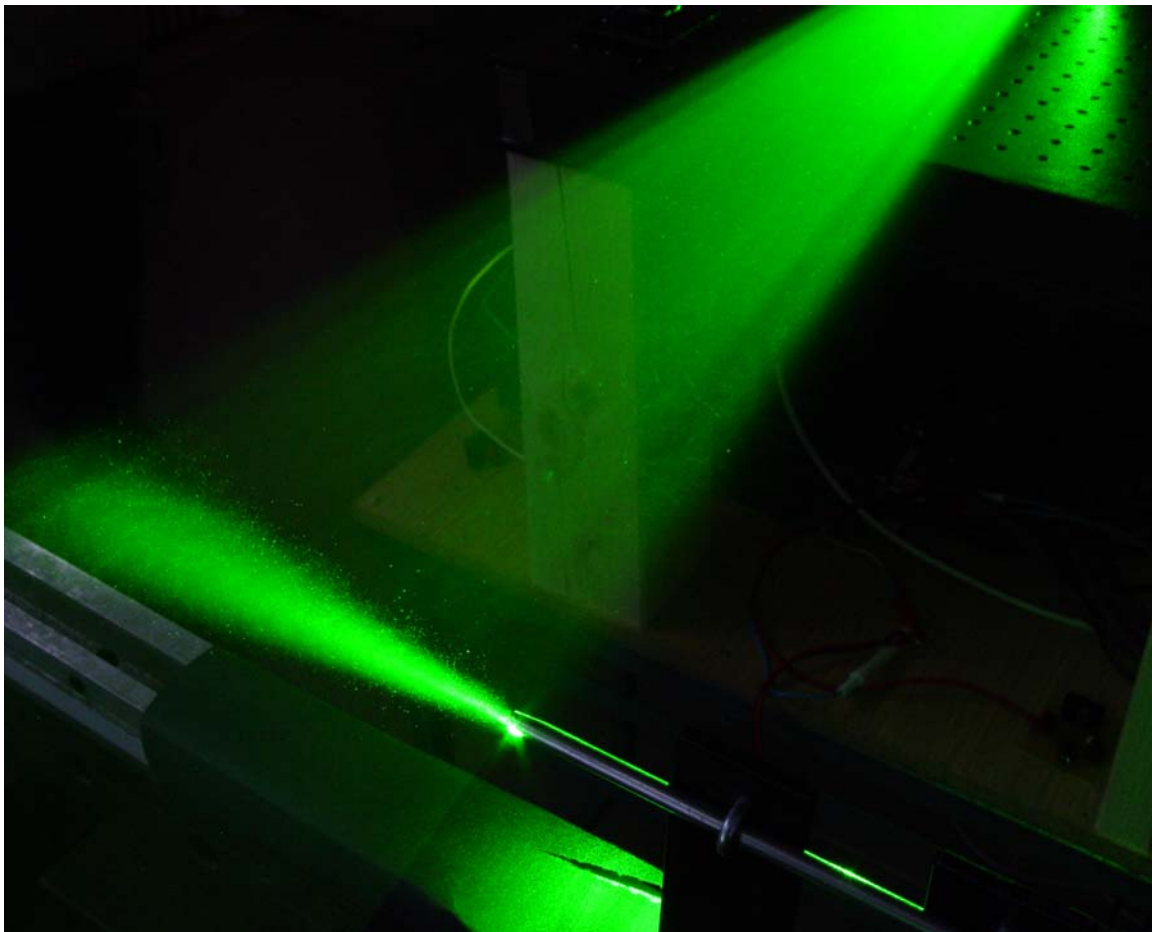
3.4.4 Časové rozestupy expozic obrazů

Důležitou roli při měření hraje časový rozstup mezi expozicemi počáteční a koncové polohy sytících částic. Nastavení tohoto parametru vyžaduje přibližnou představu o podobě měřeného proudu. Při měření byly zjišťovány rychlosti v rozmezí od nuly po rychlosti těsně podzvukové. Časový rozstup expozic obrazů musel být operativně upravován. Z požadavku rozdělení obrazu proudu do oblastí 128 x 128 pixelů, resp. 64 x 64 a dodržení podmínky pro maximální posuv v rámci vyšetřované oblasti byly stanoveny jednotlivé expoziční rozestupy. Na počátku rozběhu proudu dosahuje rozstup hodnoty 100 μ s. S narůstající rychlostí je třeba čas postupně snižovat až na limit kamery. Hodnoty rozestupů spolu s maximálními obsaženými rychlostmi jsou zachyceny v tabulce

Čas od signálu otevření ventilu [ms]	0	12	12,1	12,25	12,5	12,75	13	13,25
Maximální rychlost v proudu [m/s]	1	1	22	39	51	64	108	157
Rozestup obrazů [μ s]	100	100	10	2,5	2	2	2	2
Čas od signálu otevření ventilu [ms]	13,5	25	...	88	89	90	94	100
Maximální rychlost v proudu [m/s]	183	328	...	23	18	13	8,5	5,1
Rozestup obrazů [μ s]	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	5	5

3.4.5 Vizualizace měřeného proudu

Obr. 29 zachycuje průběh měření. Horizontální laserový řez osvětluje částice unášené proudem vzduchu z trysky.



Obr. 29 Vizualizace proudu s částicemi

Kapitola 4.

Výsledky měření proudového pole trysky

Měření trysky probíhala za podmínek popsanych v kapitole 3.1. Tlak na přívodu vzduchu zůstal po celou dobu měření konstantní 0,4 MPa. Obraz proudu byl zkoumán ve třech oblastech.

V první fázi šlo o podrobné popsání proudu těsně za ústím trysky. Zkoumaná oblast dosahovala rozměrů 20 x 15 mm. V takto malé vzdálenosti od ústí je předpokládán proud s minimálními úbytky rychlosti. Celá oblast spadá do tzv. jádra proudu trysky.

Druhá fáze zahrnovala oblast 50 x 38 mm. Ve větších vzdálenostech od trysky se měl začít projevovat rozpad jádra proudu a rozptyl proudu do větší šířky.

Třetí zkoumaná oblast navazovala na předešlé měření. Kamera zabírala proud ve vzdálenosti 50 – 100 mm od ústí trysky. Zde se předpokládal již silně narušený proud s projevujícím se přisáváním vzduchu z okolí.

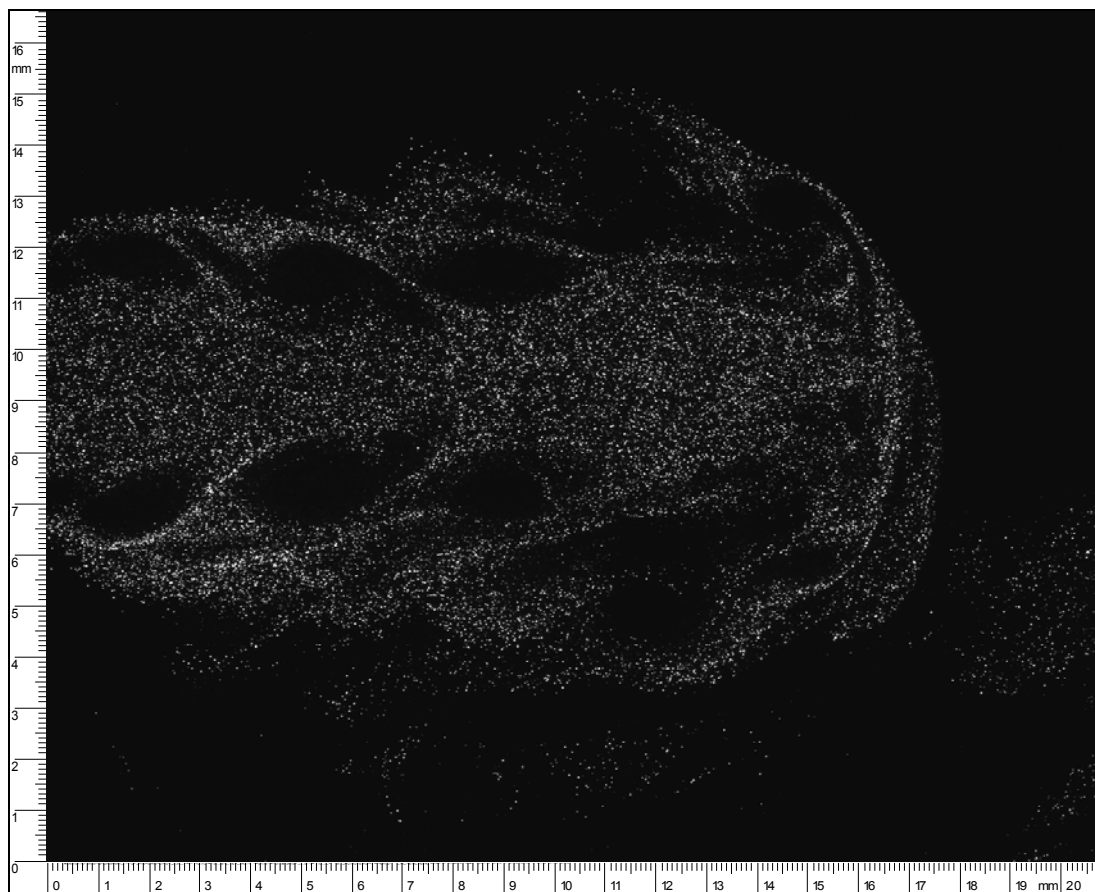
4.1 Postup měření

Měření probíhala stejně pro všechny tři oblasti. V přesných časových okamžicích odvozených od signálu pro otevření ventilu zachytávala kamera obrazy proudu, v každé druhé periodě jeden dvojobraz. Pro každý časový okamžik proudu bylo pořízeno 50 obrazů. Následoval proces výpočtu korelací, aplikací validací a filtrů. Ve finále byl ze všech 50 vektorových map spočítán průměr. Výsledek měření proudu v každém okamžiku představuje jedna průměrná vektorová mapa.

V oblasti otevírání ventilu a rozběhu proudu probíhala měření s krátkým časovým krokem. Během první milisekundy po otevření ventilu docházelo k nejzajímavějšímu vývoji proudu. Časový rozestup vektorových map proto představuje pouhých 250 μ s. Po náběhu a ustálení proudu nebylo třeba zaznamenávat obraz s tak jemným krokem, časové rozestupy měření se prodloužily na jednotky milisekund.

4.2 Zpracování měření

Měření v každém časovém okamžiku spadala pod jeden Setup. Po vypočtení každé vektorové mapy následovaly operace pro její filtraci. Na názorném příkladě jednoho obrazu bude popsán celý proces výpočtu korelací, validací a filtrací.



Obr. 30 Vizualizace rozběhu proudu

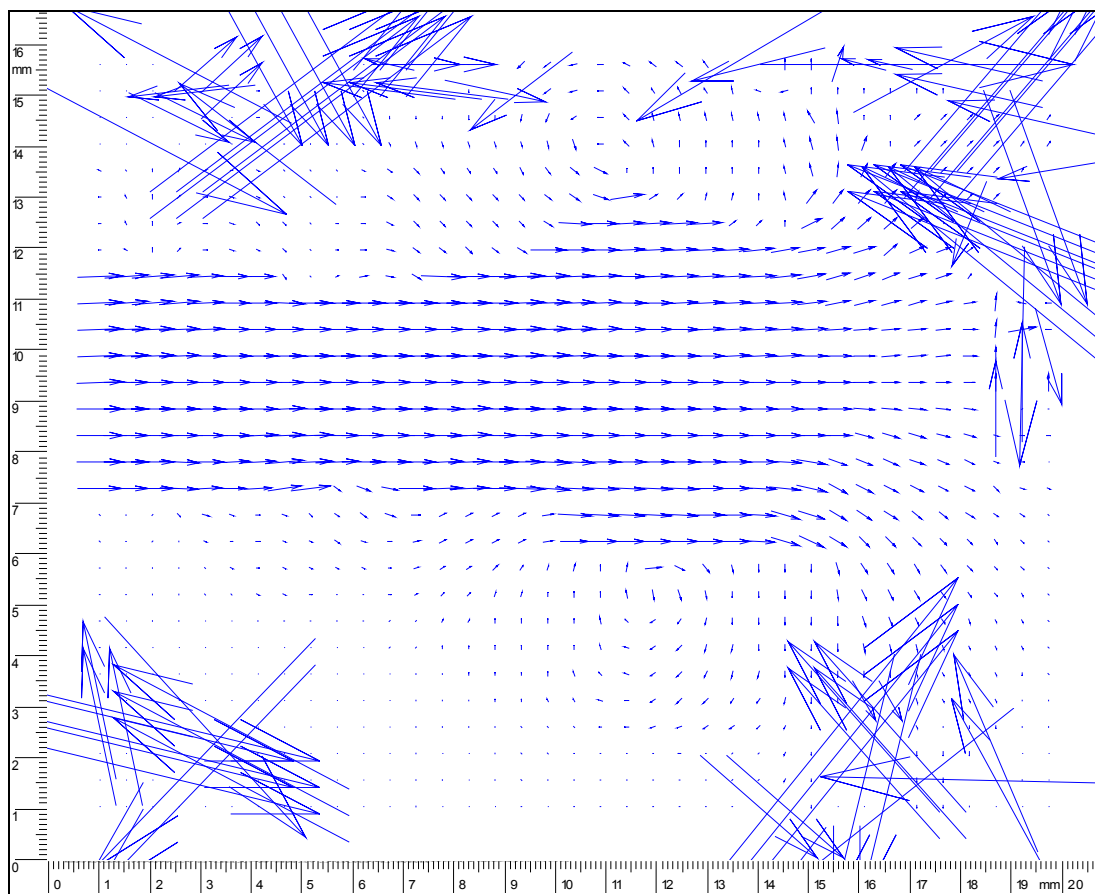
Obr. 30 představuje typickou podobu zachycených částic. Jedná se o měření nejmenší oblasti o rozměrech 20 x 15 mm. Částice byly zachyceny v čase 12,75 ms od signálu pro otevření ventilu. Střed obrazu je plně nasycen, po okrajích se částice takřka nevyskytují. To je způsobeno způsobem sycení, kdy jsou částice umístěny pouze do hlavního proudu.

Snímaná scéna je ideálně nasvícena. Při použití vyššího výkonu laseru by docházelo k přelítí obrazu částic na čipu kamery a obraz by byl pro další zpracování nevhodný. Při slabším osvětlení by kamera nebyla schopna zachytit dostatek částic a problém s výpočtem korelací by vyvstal taktéž.

Již z tohoto obrazu je jasné, jakou podobu vektorové mapy lze očekávat. Oblasti bez částic budou produkovat chyby při výpočtu vektorů.

4.2.1 Výpočet korelace

Při promítnutí obou obrazů lze zjistit přibližný posuv částic mezi expozicemi. Tento údaj je zvláště důležitý pro zadání parametrů na výpočet korelace. Maximální posunutí nesmí překročit $\frac{1}{4}$ vyhodnocované oblasti. V praxi je výhodnější používat pro výpočet daleko tvrdších podmínek. Při průměrném posunutí do 15 pixelů byla zvolena velikost vyhodnocované oblasti 128 x 128 pixelů. Takto velká oblast s rezervou splňuje základní kritérium a při použití překrývání oblastí (kapitola 1.5.3) vyhoví i dostatečnému prostorovému rozlišení proudu. Výsledek korelace je znázorněn na Obr. 31.

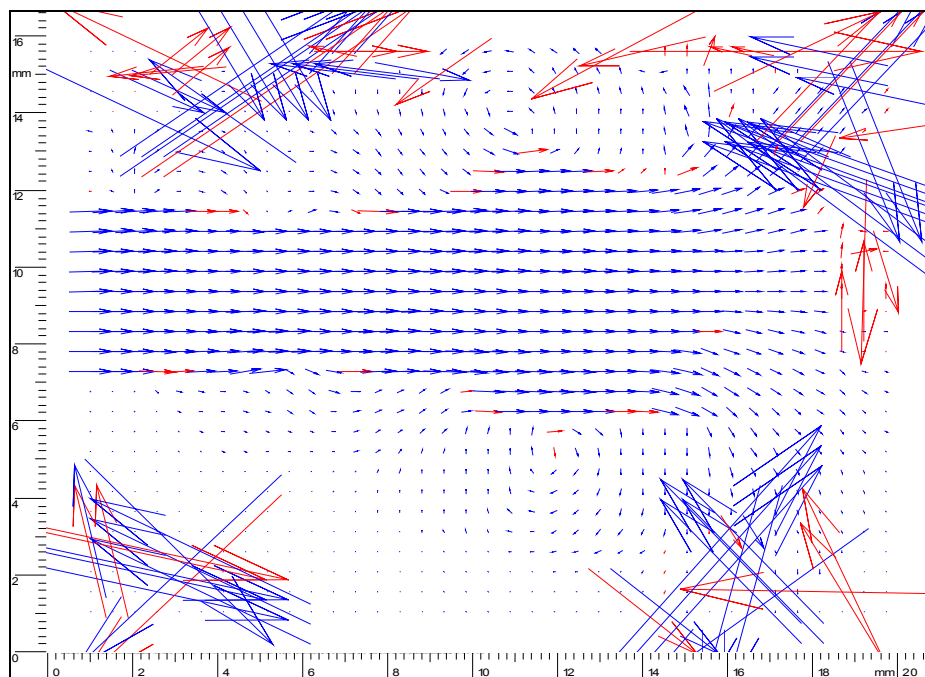


Obr. 31 Surová vektorová mapa po korelaci

Vzniku chybných vektorů v oblastech bez obsahu částic nelze v tento moment zabránit. Následným zpracováním mohou být chybné vektory odstraněny. K odstranění chybných vektorů lze využít validačních funkcí a filtrů popsaných v kapitole 1.6. Na příkladu vektorové mapy z Obr. 31 bude proveden rozbor validačních funkcí a popsáno vhodné nastavení, vedoucí k dosažení optimální podoby vektorové mapy.

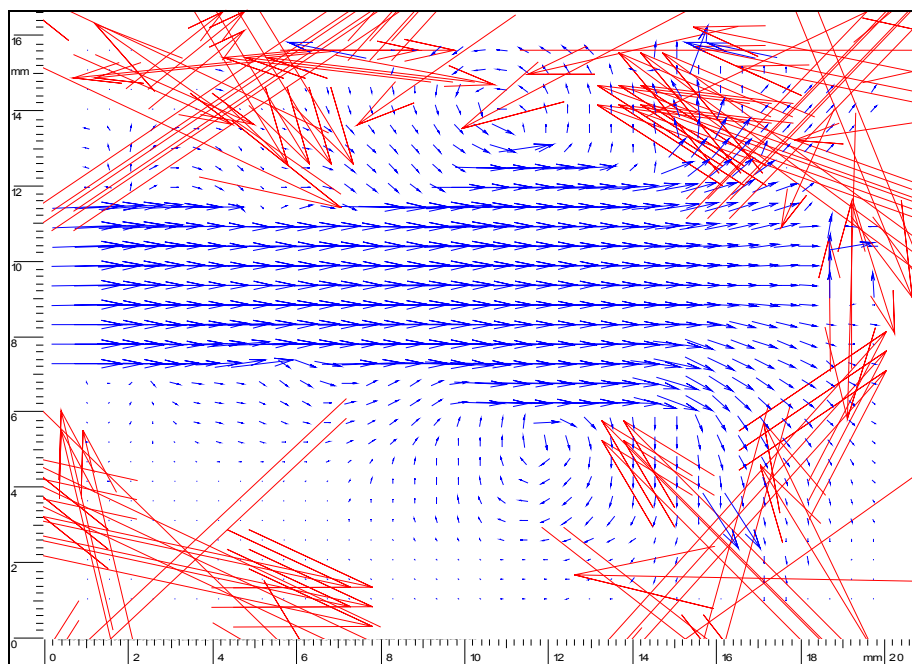
4.2.2 Validace vektorů

Obr. 32 představuje mapu po peak validaci (kapitola 1.6.1). Kriterium poměru dvou nejvyšších vrcholů bylo nastaveno na 1,2. Tato hodnota vyšla experimentálně nejlépe z kompromisu mezi odstraněním největšího možného počtu chyb a ponecháním evidentně správných hodnot. Přesto nedosahuje uspokojivých výsledků. Chybné vektory nejsou dostatečně odstraněny a naopak viditelně správné vektory uvnitř proudu zmizí. Metoda peak validace se nejeví pro tento konkrétní příklad jako příliš vhodná. Červenou barvou jsou znázorněny vektory, které nesplňují podmínky validace.



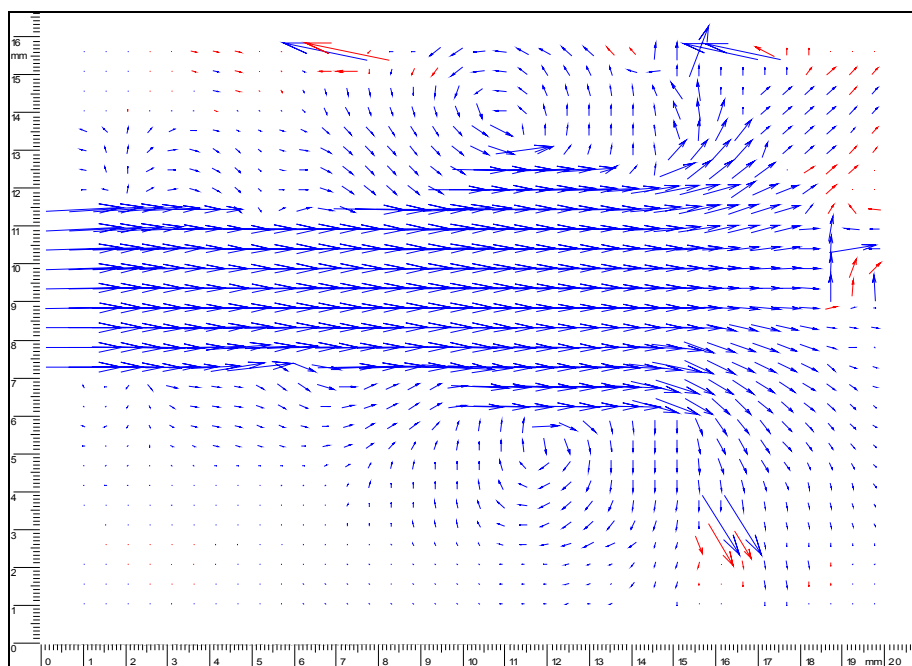
Obr. 32 Výsledek peak validace

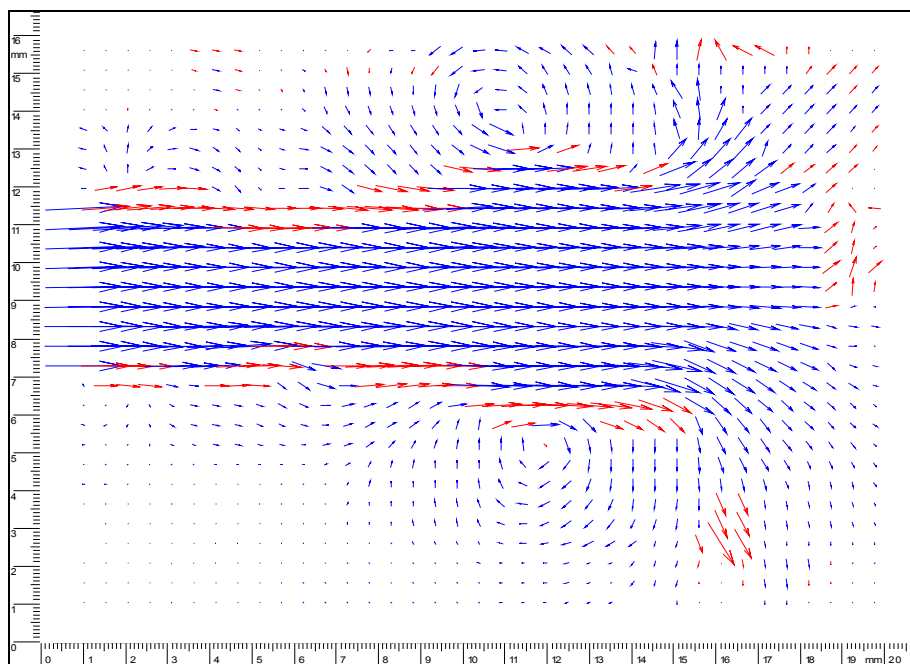
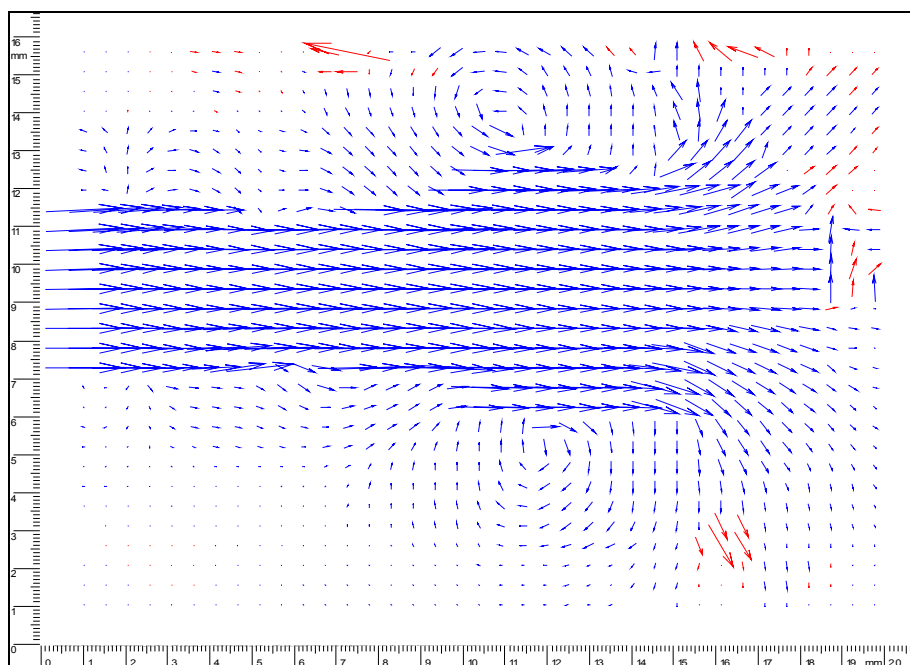
Lepší výsledky poskytuje range validace (kapitola 1.6.2). Ze surové vektorové mapy lze vyčíst maximální užitečnou rychlost. Rychlosti vyšší, vyskytující se převážně v oblastech bez sytících částic, nebudou započítány do celkového výsledku. Výsledek rozměrové validace ukazuje Obr. 33. Většina chybných vektorů neprošla validací. Celé zkoumané proudové pole zůstalo zachováno. Na zbytek chybných vektorů může být nasazena poslední validační metoda.



Obr. 33 Range validace

Validace klouzavým průměrem zkoumá příslušnost hodnoty rychlosti ke svému okolí. Algoritmus výpočtu je podrobně popsán v kapitole 1.6.3. Odchylka jednotlivého vektoru od průměru vektorů v oblasti nesmí překračovat stanovený koeficient. S nastavením parametrů pro tento druh validace musí být uživatel velmi opatrný. Vektory z předešlé validace nejsou zahrnuty do výsledku a tak červená barva označuje pouze vektory odstraněné průměrovou validací.

Obr. 34 Průměrová validace s koeficientem $k=0,2$

Obr. 35 Průměrová validace s koeficientem $k=0,02$ Obr. 36 Průměrová validace s koeficientem $k=0,05$

Série vektorových map ukazuje jak rozdílné výsledky mohou vzniknout při různém nastavení validačního koeficientu. V prvním případě byl validační koeficient na hodnotu $k=0,2$. Takto slabá podmínka není schopná vyřadit potřebné množství chybných vektorů. Při příliš malém validačním koeficientu dojde k odstranění relevantních vektorů. Oblasti, s odchylkami jednotlivých vektorů nesplňujících podmínku 1.8, lze nalézt i uvnitř proudů.

Děje se tak zejména v oblastech přechodu mezi proudem a okolním vzduchem, nebo na okrajích vírů. Vyhodnocením jednotlivých výsledků validace byl zvolen nejvhodnější koeficient $k=0,05$. Výsledek validace s tímto nastavením je na Obr. 36. Většina chybných vektorů je odstraněna a hlavní proud není nijak narušen.

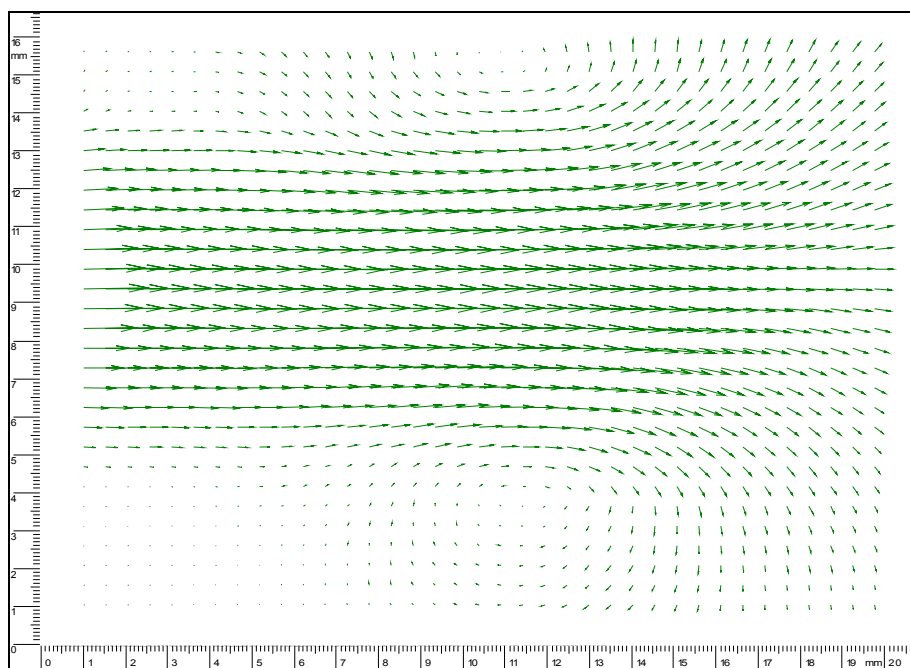
Validace všech měření v této práci byly provedeny právě s touto hodnotou.

4.2.3 Filtrování vektorové mapy

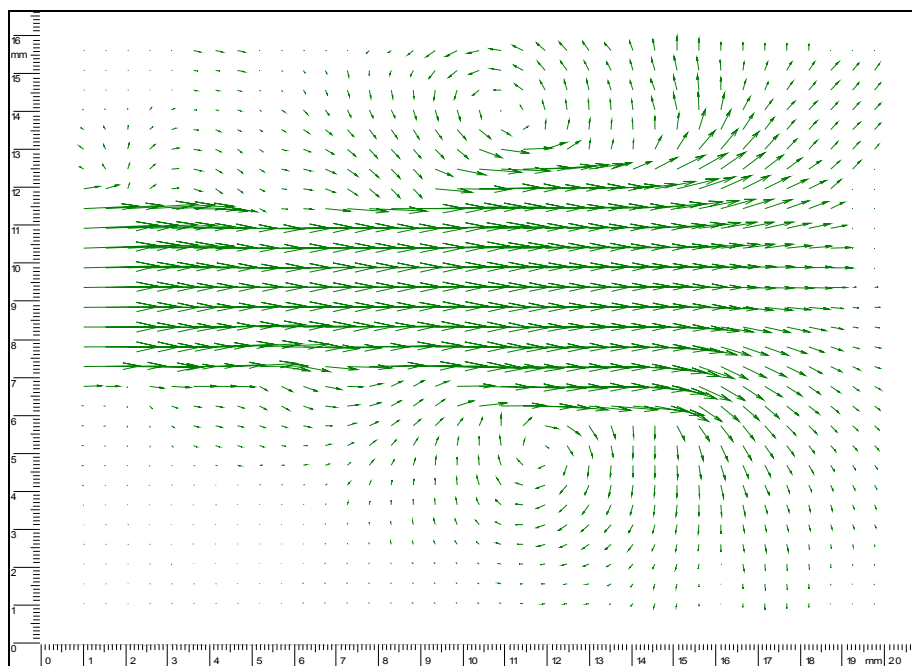
K vyhlazení a odstranění posledních chyb následuje po validaci filtrace. Pracuje na principu průměrování popsaného v kapitole 1.6.3. Každému vektoru je přiřazena průměrná hodnota rychlostí v zadaném okolí.

V závislosti na velikosti uvažovaného okolí dochází k vyhlazování mapy. Při zpracování dat si je nutné uvědomit, do jaké měry lze naměřená data filtrovat. Při výpočtu průměrných rychlostí z velké oblasti, je odstraněna většina rušivých vektorů a směr pohybu se dokonale sjednotí a narovná. Takové výsledky mohou působit líbivým dojmem, od reálného proudu se však již značně liší. Skutečné rychlostní gradienty díky filtraci zaniknou, drobné víry v proudu nebudou takřka patrné. Obr. 37 ukazuje nesprávnou filtraci vektorové mapy s výpočtním okolím 9x9.

Na různorodý proud s vířivou povahou je nejvhodnější aplikovat filtr s nejmenším možným okolím. Za cenu nedokonale vyhlazené vektorové mapy, poskytuje věrohodnější a realitě lépe odpovídající obraz. Obr. 38 ukazuje filtrovanou mapu s okolím 3x3 oblasti.

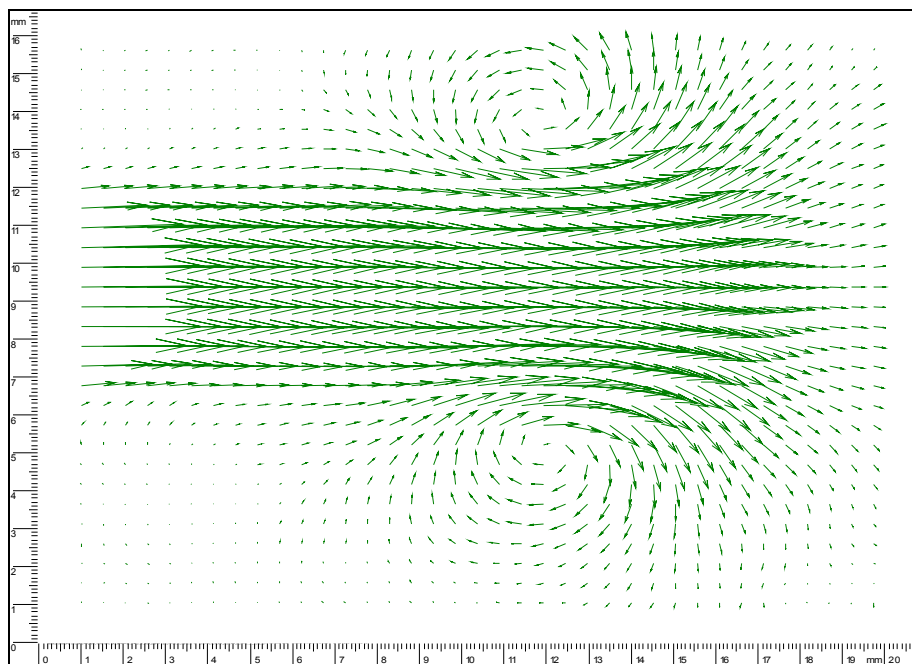


Obr. 37 Nesprávná filtrace vektorové mapy



Obr. 38 Vektorová mapa po správné filtraci

Na Obr. 38 jsou stále patrné drobné odchylky mezi některými sousedními vektory. Při požadavku na získání kvalitních výsledků nestačí zachytit pouze jednu mapu v daném čase. Vzhledem k opakovatelnosti měřeného děje bylo získáno v každém okamžiku periody 50 záznamů a z nich stanoven výsledný průměr na Obr.39.



Obr. 39 Výsledná vektorová mapa z 50 měření

4.3 Výsledky měření

Běh trysky se dělí do tří fází. Při frekvenci 8Hz trvá celý děj přibližně 100 ms. Během této doby dojde k rozběhnutí, ustálení a nakonec po uzavření ventilu k doběhu proudu vzduchu. Důležitý parametr představuje doba od signálu pro otevření ventilu po rozběh proudu z trysky. První úkol tedy spočíval ve stanovení přesného času, kdy dochází k prvnímu pohybu vzduchu za tryskou. Od tohoto okamžiku probíhalo měření po krátkých krocích (0,25ms resp. 1ms).

V oblasti ustáleného proudu stačilo proměřit proud po 5ms. Během uzavírání ventilu a při doběhu proudu byl rozestup operativně měněn v závislosti na probíhajících změnách rychlosti.

Výsledky měření nejsou prezentovány pouze ve formě vektorových map. K lepšímu pochopení probíhajících dějů lze výsledky zobrazit ve formě skalární map. Tyto mapy mohou představovat složky rychlostí v jednotlivých osách, intenzity turbulencí, standardní odchylky proudu v určitém bodě apod.

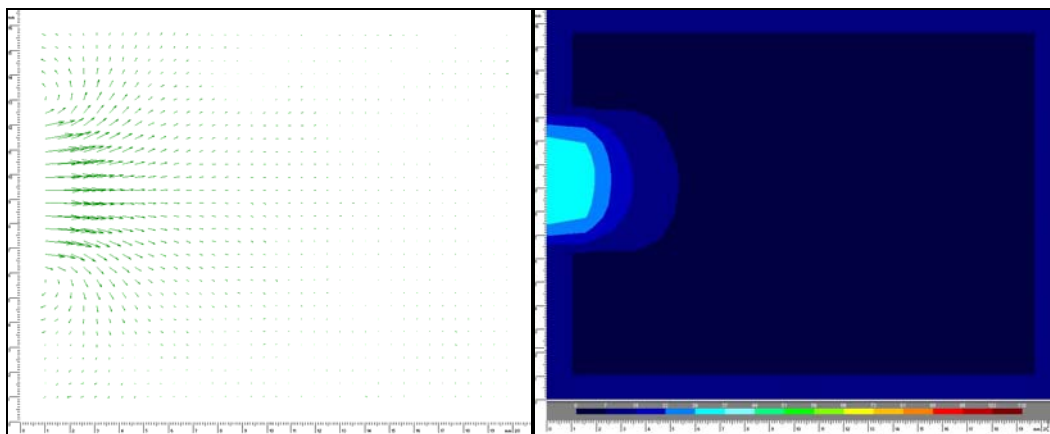
4.3.1 Rozběh proudu

Proud za tryskou se začíná vyvíjet 12,00 ms po spouštěcím signálu ovládacího obvodu ventilu. Tuto dobu lze rozdělit mezi zpoždění ventilu a průchod vzduchu ventilem, vzduchovým vedením a tryskou. Jakým poměrem se zpoždění mezi tyto dvě složky dělí nedokáže metoda určit. V praxi je důležitá pouze celková doba pro nastavení předstihu spouštěcího signálu v tkacím stroji.

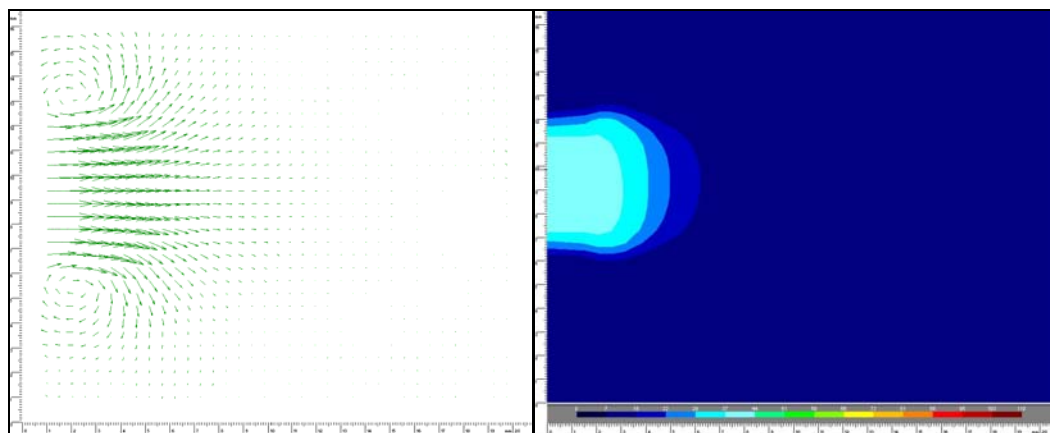
Pro první milisekundu rozběhu proudu bylo zaznamenáno 6 vektorových map. Rychlost proudu se z takřka nulové hodnoty zvýšila na 108 m/s. Po dalších 3 ms dosahuje 90 procent maximální rychlosti proudu. V tomto čase se z trysky vypouští útková nit. Rychlost se na maximální hodnotě ustálí v čase 25 ms od signálu pro otevření ventilu, což znamená 13 ms od začátku rozběhu proudu.

Následující série obrázků ukazuje podrobně rozběh proudu trysky. Obrazy byly snímány z minimální vzdálenosti, takže poskytují detailní pohled. V prvním případě se jedná o zkoumanou oblast 25 x 15 mm. Obraz začíná 4 mm za ústím trysky.

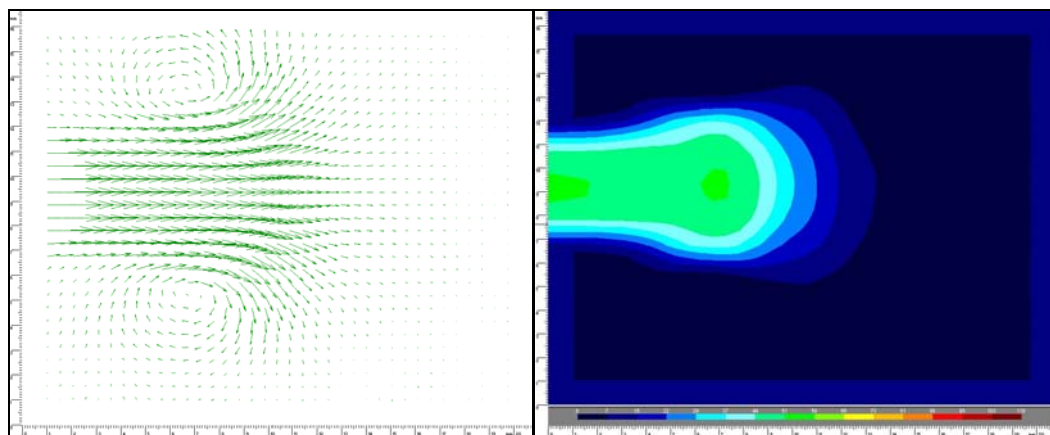
Výsledky jsou prezentovány ve formě vektorových map a skalárních map složky rychlosti ve směru osy trysky. Obr. 40–44 mají všechny stejné měřítko.



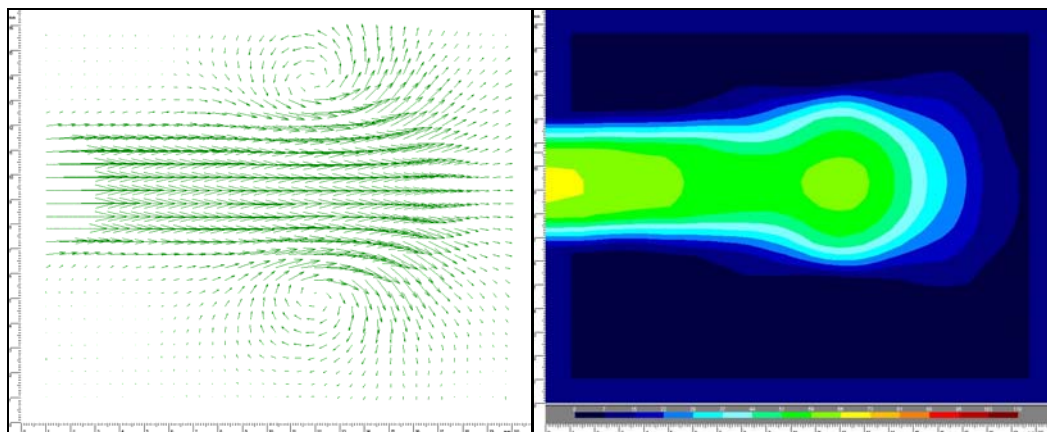
Obr. 40 Vektorová a skalární mapa v čase 12,1 ms – max. rychlost 22 m/s



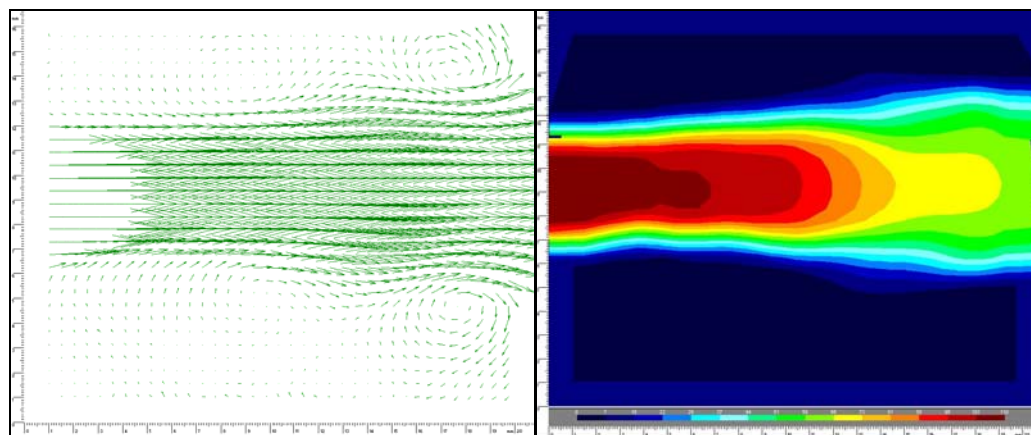
Obr.41 Vektorová a skalární mapa v čase 12,25 ms – max. rychlost 39 m/s



Obr. 42 Vektorová a skalární mapa v čase 12,5 ms – max. rychlost 51 m/s



Obr. 43 Vektorová a skalární mapa v čase 12,75 ms – max. rychlost 64 m/s



Obr. 44 Vektorová a skalární mapa v čase 13,0 ms – max. rychlost 108 m/s

Série Obr. 40 – 44 dokumentuje rozběh trysky v první milisekundě po otevření ventilu. Prudký nárůst rychlosti je doprovázen vznikem dvojice víru po okrajích proudu. Víry jsou symetrické podle osy trysky, mají opačný směr rotace a postupují na čele proudu.

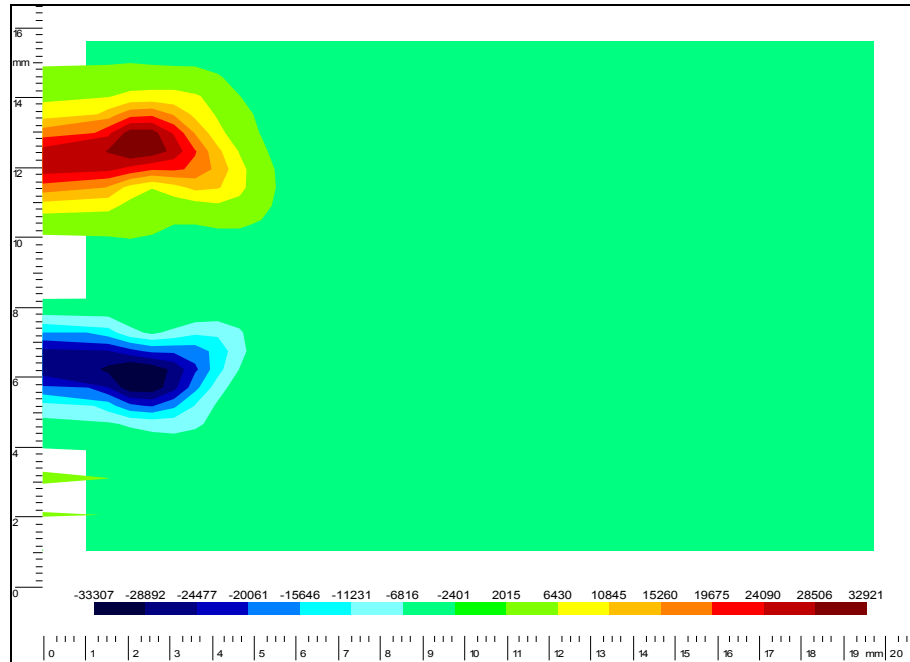
V prostorovém ztvárnění se jedná o anuloidní vír. Ve většině případů je zadní strana víru mírně zdeformována.

Mezi víry se začíná vytvářet rychlostní profil proudu, k jeho ustálení dojde v oblasti stacionárního proudění.

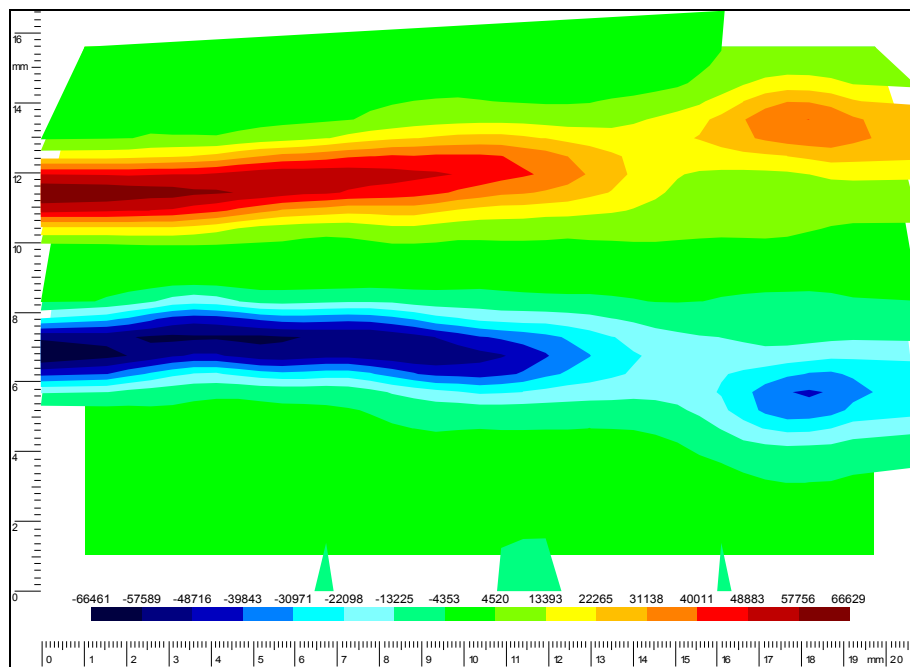
Skalární mapy zobrazují vznikající jádro trysky. V prvních okamžicích vstupu do klidného prostředí je čelo proudu rozšířené z důvodu brždění.

Odišný pohled na rozbíhající se proud představuje mapa vířivosti. Funkce je definována v kapitole 1.6.5.

Na Obr. 45 pronikají víry do zkoumané oblasti. Každý má opačnou hodnotu intenzity vířivosti, hodnoty jsou podobné. V čase 13,00 ms (Obr. 46) jsou víry na konci oblasti. Vířivost uvnitř vírů nedosahuje maximálních hodnot v obraze.. Maximálních hodnot vířivosti je dosaženo na krajích proudu vzhledem k velkému rychlostnímu gradientu mezi jádrem proudu a okolnímu prostředím. Rozhodující roli hraje pouze x-ová osa rychlosti.



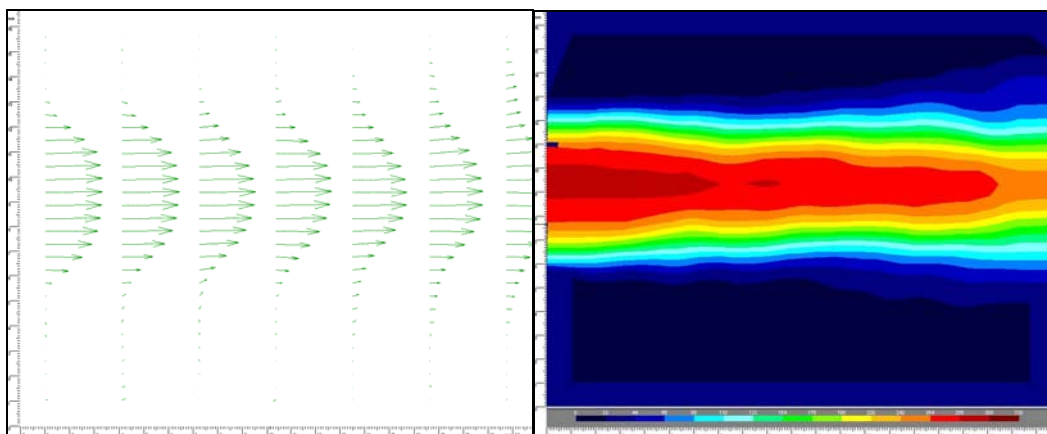
Obr. 45 Skalárni mapa vířivosti v čase 12,25 ms



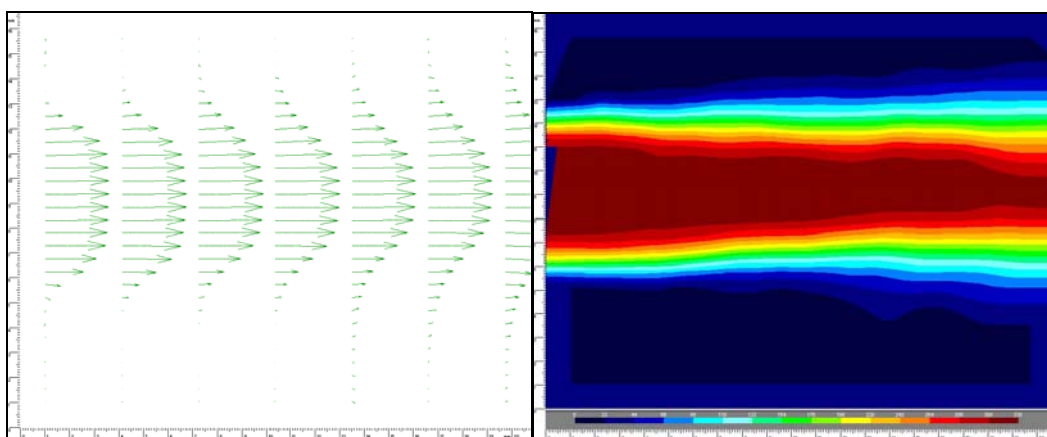
Obr. 46 Skalárni mapa vířivosti v čase 13,00 ms

4.3.2 Ustálení a doběh proudu

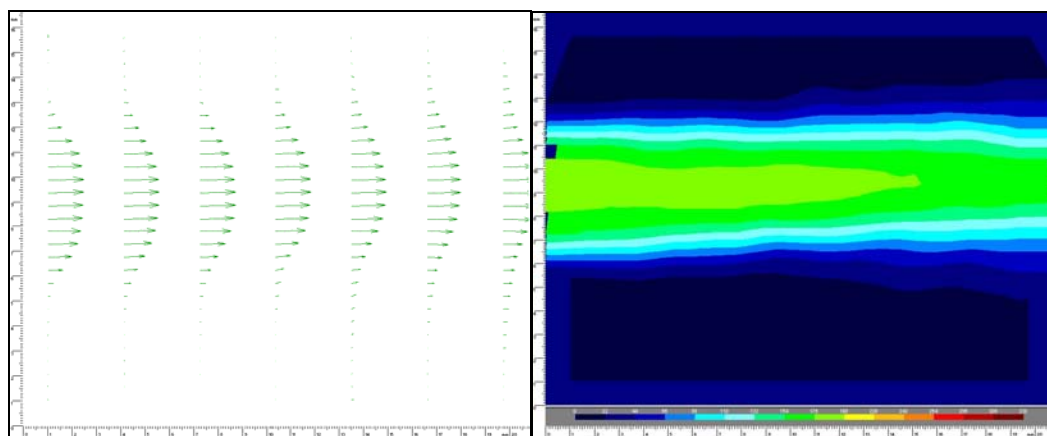
Ustálení proudu na maximální hodnotu spolu s doběhem reprezentuje série obrázků 47-50.



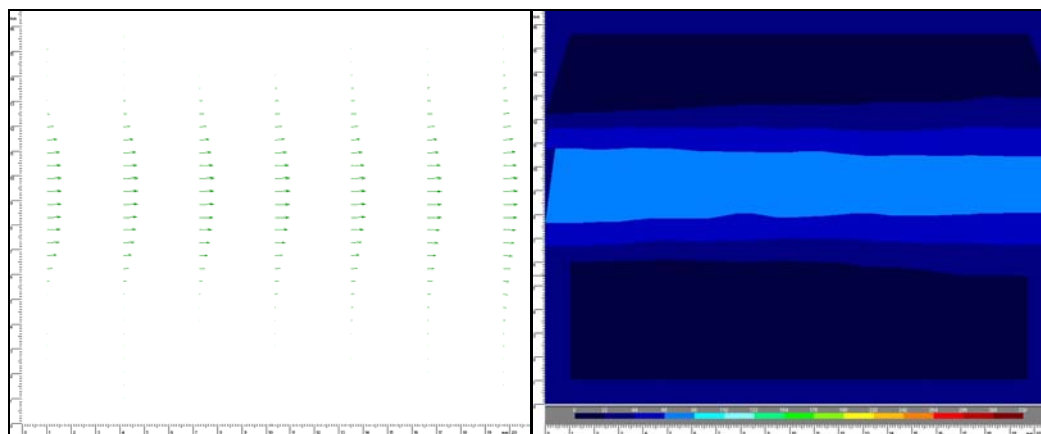
Obr. 47 Vektorová a skalární mapa v čase 16,0 ms – max. rychlost 290 m/s



Obr. 48 Vektorová a skalární mapa v čase 50,0 ms – max. rychlost 325 m/s



Obr. 49 Vektorová a skalární mapa v čase 80,0 ms – max. rychlost 182 m/s



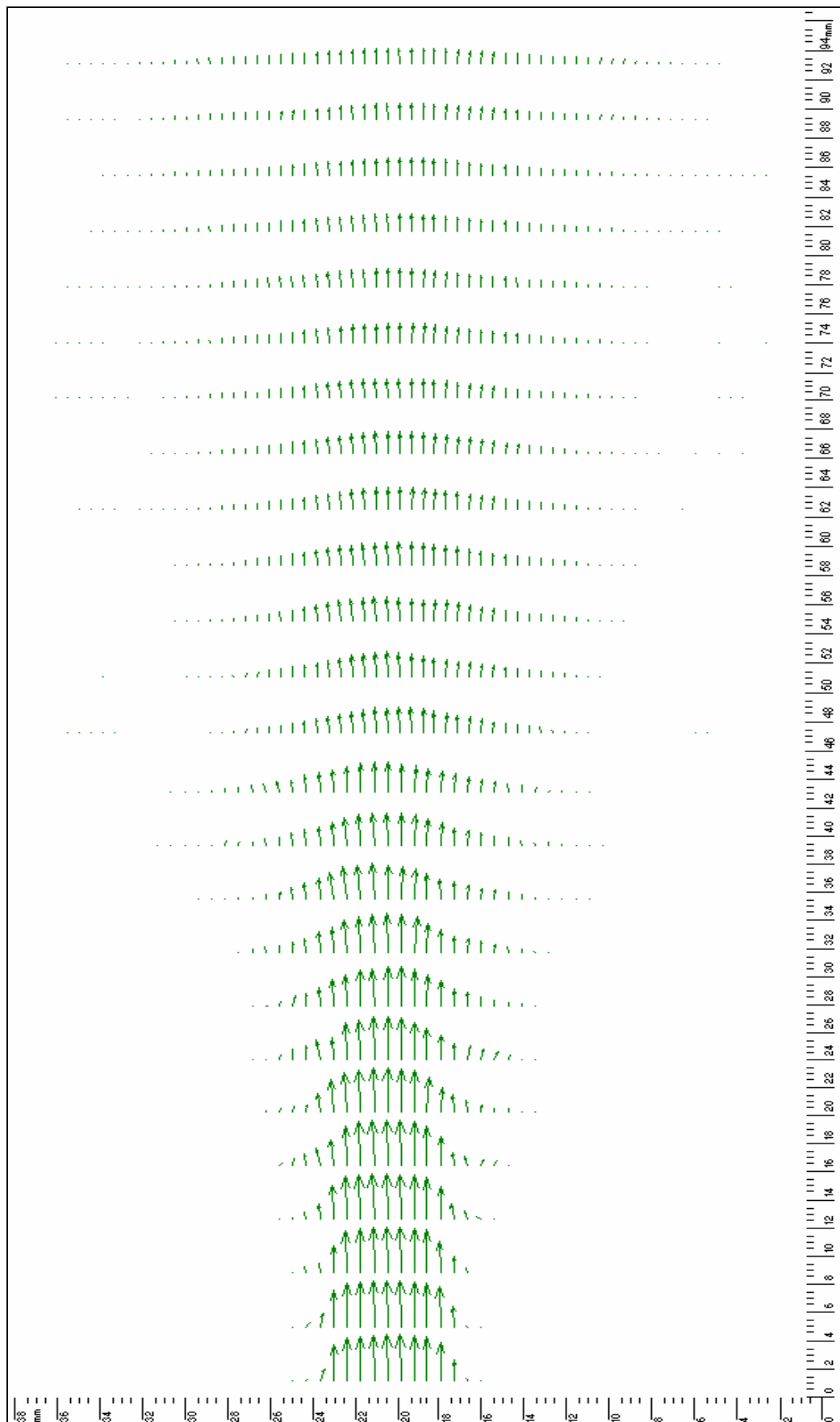
Obr. 50 Vektorová a skalární mapa v čase 85,0 ms – max. rychlost 70 m/s

Po prudkém náběhu rychlosti a odeznění vírů dochází k postupnému ustálení proudu. Přechod z 90 % rychlosti na maximální hodnotu již není zdaleka tak strmý jak při rozběhu. Dosažená rychlost 328 m/s zůstává až do uzavření ventilu přibližně stejná. Obr. 48 představuje plně rozběhlý proud. Jeho podrobnější pohled a popis bude následovat v kapitole 4.3.3. Na Obr. 49 a Obr. 50 klesá rychlost po uzavření ventilu. Nedochází k žádnému náhlému poklesu rychlosti. Doba do uklidnění proudu k nulovým hodnotám je nepoměrně větší oproti rozběhu. Rychlostní profil si udržuje neměnný tvar až do úplného odeznění proudu.

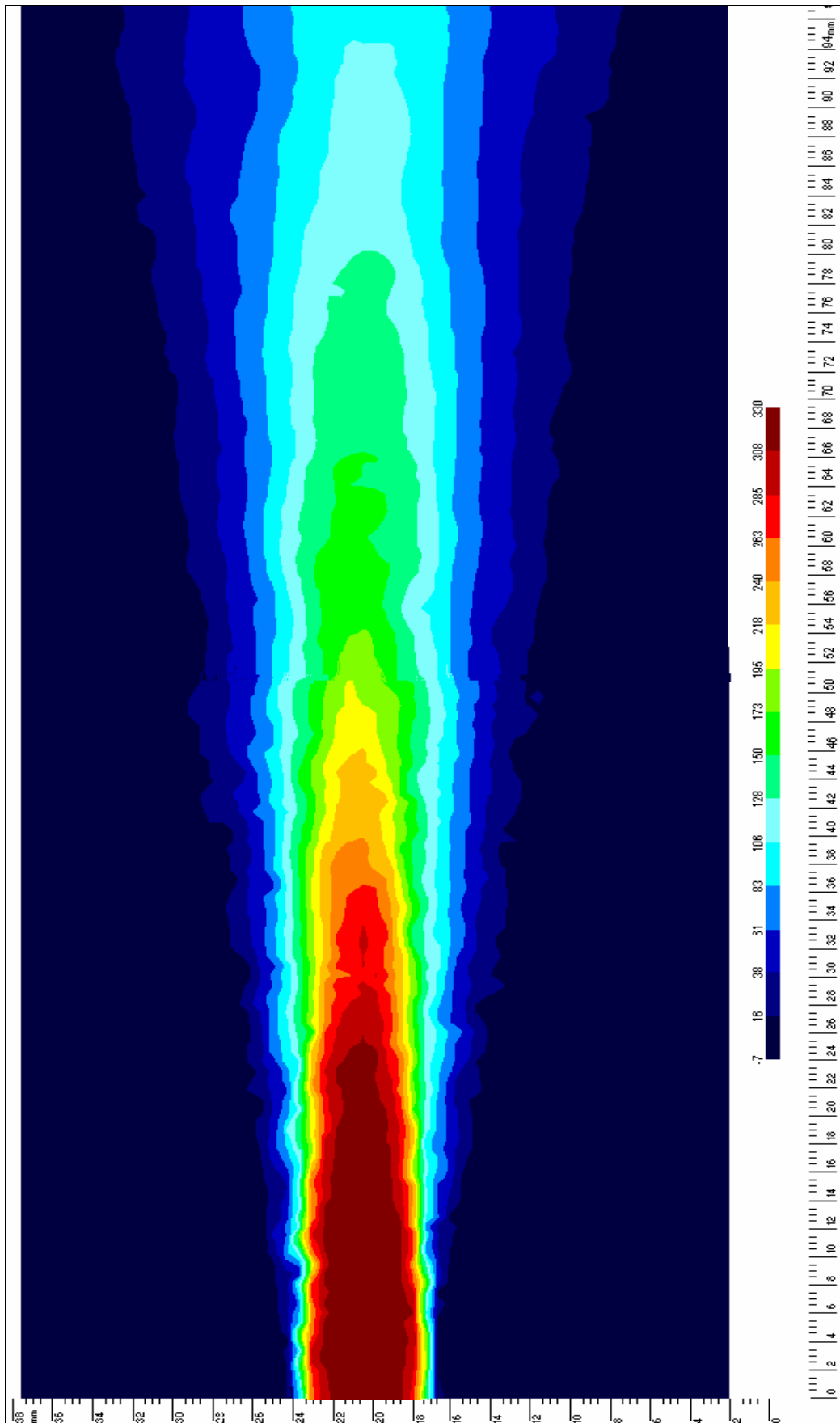
4.3.3 Rychlostní profil stacionárního proudu

Stacionární oblast se v proudu nachází v čase od 25 ms do 70 ms. Maximální rychlost 328 m/s se vyskytuje těsně za ústím trysky. S přibývajícím vzdáleností postupně klesá. Rychlostní profily přesně odpovídají průběhu zatopeného proudu. Tvar profilů je v blízkosti trysky takřka plochý v celé její šíři. Čím dále od trysky, tím více se rychlostní profil zaobluje. Zvětšuje se rovněž i šířka proudu. Ve větších vzdálenostech dochází k přisávání vzduchu z okolního prostředí. Na krajích proudu potom vznikají nestacionarity. Ty lze studovat pouze na jednotlivých snímcích, při průměrování 50 měření zaniknou.

Zkoumání proudu se nesoustředilo jen na detailní pohled proudu těsně za tryskou. V druhé fázi byl proud prozkoumán až do vzdálenosti 95 mm od ústí. Obr. 51 ukazuje celé takto změřené vektorové pole. Na skalární mapě x-ové složky rychlosti Obr. 52 je nejtmavší rudou barvou znázorněno jádro proudu trysky představující 100-90% maximální rychlosti.



Obr. 51 Vektorová mapa ustáleného proudu



Obr. 52 Skalární mapa složky rychlosti v ose trysky u ustáleného proudu

4.3.4 Časový vývoj proudu

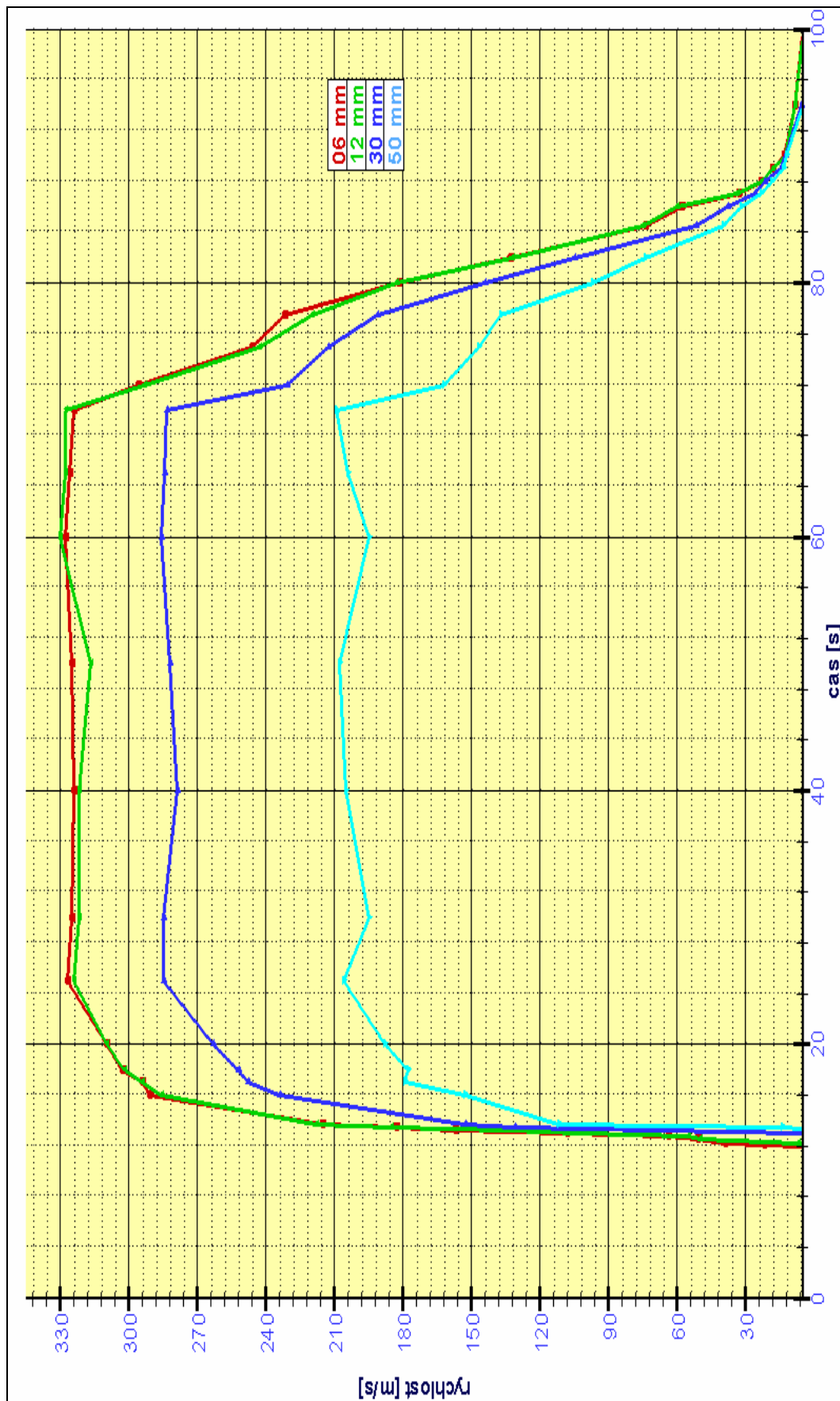
Série obrázků v kapitole 4.3.2 naznačuje jakým způsobem se proud vyvíjel. Podrobnější časovou závislost jednotlivých bodů různě vzdálených od trysky ukazuje graf na Obr. 53. Na grafu jsou zachyceny rychlosti v ose trysky vzdálené 6 mm, 12 mm, 30 mm a 50 mm od ústí.

První zaznamenaná rychlost spadá do doby 12 ms po signálu k otevření ventilu. Následuje prudký rozběh rychlosti. Za 4 ms vzroste rychlost na přibližně 300 m/s. Průměrné zrychlení odpovídá hodnotě $75\,000\text{ m/s}^2$. Za dalších 9 ms se proud ustálí na maximální hodnotě 328 m/s. Následuje oblast stacionárního proudu trvající přibližně 50 ms.

Zajímavým jevem objevujícím se na všech měřeních je drobný pokles rychlosti uprostřed stacionární oblasti. Jedná se o pokles v řádu jednotek procent nicméně je dobře patrný. Může být spojen s turbulentními ztrátami kinetické energie, s nespecifikovanými ději v přívodu vzduchu popřípadě s jinými důvody. Jev by vyžadoval podrobnější prozkoumání, neboť se vyskytuje v oblasti nejvíce využívané pro tkalcovské účely.

První náznaky poklesu rychlosti se projeví až v 70. ms. Tento okamžik je 20 ms za signálem pro zavření ventilu. Dlouhou reakční dobu ventilu má na vině naindukovaný proud uvnitř cívky elektromagnetu spolu s odporovou silou protékajícího vzduchu. Proces doběhu vzduchu je poměrně dlouhý. Rychlost klesá k nulové hodnotě až po dalších 30 ms. Při použité frekvenci 8 hertz vychází 37 ms takřka absolutního klidu proudu.

Vývoj proudu podrobně dokumentují animace vektorových i skalárních map. Všechny jsou uloženy na přiloženém CD.



Obr. 53 Vývoj rychlosti proudu v ose trysky

Kapitola 5

Závěr

Diplomová práce ukázala možnosti měřicí metody PIV pro zkoumání rychlých výrazně nestacionárních proudů v tekutinách. K tomuto účelu byl podrobně popsán a zprovozněn synchronizační aparát zajišťující sladění systému PIV s měřeným zařízením.

Byly popsány dva základní postupy pro synchronizaci měřicího systému. I když byla synchronizace připravována pro konkrétní úlohu, lze navržené postupy univerzálně využít pro další aplikace. Základní podmínkou zůstává pouze napět'ové přizpůsobení technologii vstupů a výstupů měřicího systému.

Navržený systém pro studium nestacionárních polí byl ověřen při měření proudu za hlavní tkací tryškou s elektromagnetickým ventilem. Výsledky popisují proudové pole z hlediska rychlostních profilů, ukazují míry vířivosti v jeho jednotlivých oblastech a kompaktnost jádra proudu. Výsledky mohou pomoci při návrhu a seřizování dalších tkacích trysek.

Získanou podobu časového vývoje proudu lze mimo jiné využít pro přesné nastavení tkacích strojů. Důležité parametry tkacího procesu představují zejména předstih pro otevření ventilu, délka času po kterou má být ventil otevřen a doba pro vložení útku do ejektoru trysky s vyhovující rychlostí proudu. Tyto parametry lze podle naměřených údajů o proudu spolehlivě nastavit s přesností na jednotky milisekund.

Dosažené výsledky byly prezentovány na mezinárodní konferenci „Aplikácia experimentálných a numerických metod v mechanike tekutin“ pořádané Žilinskou univerzitou.

K diplomové práci jsou přiložena 2 CD, obsahující 3 databáze s naměřenými výsledky. První databáze ukazuje proudové pole v detailním pohledu 20 x 15 mm. Další dvě databáze mapují proud až do vzdálenosti 10 cm od ústí trysky. Databáze zahrnují podobu vizualizace proudu s částicemi, výsledky korelací, filtrů a dalších analýz.

Na CD jsou rovněž přiložena videa dokumentující podrobný vývoj proudu v celé oblasti jedné periody. Dále CD zahrnují samostatný soubor popisující funkce a nutná nastavení synchronizačního aparátu. Ten bude sloužit jako návod pro další měření s PIV systémem.

Použitá literatura

- [1] KOPECKÝ, V.: Laserová anemometrie v experimentální mechanice tekutin
- [2] DANTEC DYNAMICS: FlowMap Particle Image Velocimetry Instrumentation, Denmark, Tonsbaken, 2000
- [3] RAFAEL, M., Willert, C., Kompenhans, J : Particle Image Velocimetry, Springer
- [4] KOPECKÝ, V: Využití laserové dopplerovské anemometrie při vývoji tryskových tkacích strojů. Jemná mechanika a optika 10/98, ročník 43, str. 303 - 307
- [5] KOPECKÝ, V., Kotek, M., Hejralová, Š.: Měření proudových polí tkacích trysek metodou PIV, sborník konference Aplikácia experimentálních a numerických metod v mechanice tekutin, p. 245-250, 2004
- [6] KOPECKÝ, V., Kotek, M., Hejralová, Š.: Identifikace nestacionárního rychlostního proudového pole za tryskou metodou PIV, sborník konference XXIII. mezinárodní vědecká konference kateder a pracovišť mechaniky tekutin a termomechaniky, 2004
- [7] DANTEC DYNAMICS: Firemní podklady
- [8] KEANE, R.D., ADRIAN, R.J.: Theory of cross-correlation analysis of PIV images. applied Scientific Research 49, p. 191-215, 1992
- [9] KEANE, R.D., ADRIAN, R.J.: Optimization of particle image velocimeters. Part I: Double pulsed systems. Measurement Science and Technology 1, p. 1202-1215, 1990
- [10] KEANE, R.D., ADRIAN, R.J.: Optimization of particle image velocimeters. Part II: Multiple-pulsed systems. Measurement Science and Technology 2, p. 963-974, 1991
- [11] KOPECKÝ, V.: Limits and Biases of Particle Image Velocimetry. 5th workshop on Electronics, Control, Modelling, Measurement and Signals, Université Paul Sabatier Toulouse – France, May, 30 – 31, June 1, 2001